LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 30
febbraio 1971
anno IV
volume VI

I reattori convertitori veloci

I reattori nucleari a neutroni veloci producono piú combustibile di quello che consumano e permettono cosí di ottenere energia elettrica a basso costo senza pesare sulle risorse naturali e rispettando l'ambiente

di Glenn T. Seaborg e Justin L. Bloom

Uno dei piú gravi problemi sociali e tecnologici che la nostra società dovrà risolvere nei prossimi decenni, è rappresentato dalla necessità di produrre enormi quantità di energia elettrica senza modificare in modo sensibile l'ambiente esterno. La Federal Power Commission degli USA ha valutato che nei prossimi 30 anni le industrie americane utilizzeranno, oltre agli attuali 300, altri 1600 milioni di chilowatt di energia elettrica. L'opinione pubblica si è sempre interessata dei problemi concernenti l'habitat, del miglioramento delle qualità e delle caratteristiche di purezza dell'acqua e dell'aria, ma ha sempre trascurato un fattore estremamente importante: per far funzionare i diversi tipi di impianti di purificazione dell'aria e dell'acqua e gli impianti di rigenerazione dei rifiuti sarà necessaria in futuro una grande quantità di energia elettrica.

Un problema di uguale importanza riguarda la razionale utilizzazione delle riserve naturali di carbone, di petrolio e di gas. Fra non molto queste materie prime saranno di gran lunga piú utili come fonti di prodotti organici che non come fonti di energia. Inoltre una riduzione del consumo di combustibili organici comporterà una diminuzione proporzionale dell'inquinamento atmosferico da parte dei residui di combustione.

Questi problemi potrebbero essere risolti convenientemente dai reattori nucleari del tipo « breeder » (cioè *convertitori* o *autofertilizzanti*). Questi reattori producono una quantità di combustibile nucleare superiore a quella consumata e permetteranno quindi di utilizzare per migliaia di anni, come sorgenti di energia a basso costo, le enormi quantità di uranio e di torio contenute in bassa concentrazione nelle rocce terrestri. Inoltre, questi reattori non daranno origine a inquinamenti atmosferici. Alla luce di queste considerazioni la US Atomic Energy Commission, l'industria nucleare e i produttori di energia elettrica stanno compiendo un grosso sforzo per sviluppare gli studi che renderanno possibile la realizzazione, entro il 1984, di un reattore capace di produrre energia elettrica su scala commerciale.

La conversione nucleare è ottenuta utilizzando i neutroni liberati durante il processo di fissione. La fissione di ogni atomo di combustibile nucleare, come quella dell'uranio-235, libera in media piú di due neutroni veloci (cioè di alta energia). Perché si mantenga la reazione nucleare a catena è necessario che uno di questi neutroni stimoli una successiva fissione; alcuni neutroni vanno persi, altri invece vengono impiegati per generare nuovi atomi fissili, cioè, per trasformare isotopi *fertili* di elementi pesanti in isotopi fissili. Gli elementi fertili utili per questo tipo di reattore sono il torio-232, che si trasforma in uranio-233, e l'uranio-238, che si trasforma in plutonio-239 (*si veda la figura nella pagina seguente*).

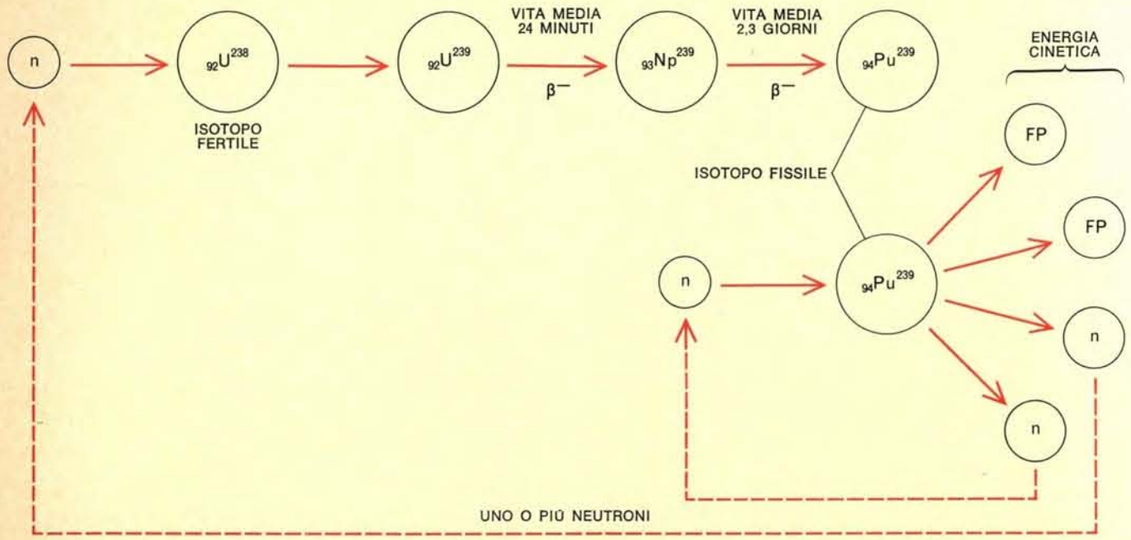
Come già detto, si parla di conversione quando si produce una quantità di materiale fissile doppia di quella presente inizialmente nel reattore. Alla fine del tempo di raddoppiamento, il reattore avrà cosí prodotto una quantità di materiale fissile sufficiente per autoalimentarsi e per alimentare un'altro reattore identico. Un reattore convertitore, per essere competitivo, dovrebbe avere un tempo di raddoppiamento compreso fra sette e dieci anni.

Si possono avere due diversi tipi di conversione a seconda del materiale sottoposto alla trasformazione nucleare: la conversione termica, cioè a neutroni lenti, è piú efficiente per la trasformazione del torio-232 in uranio-233 (ciclo del torio); la conversione veloce, cioè a neutroni a piú alta energia, è invece piú efficace per la trasformazione dell'uranio-238 in plutonio-239 (ciclo dell'uranio). Nei reattori veloci l'assorbimento non produttivo di neutroni è inferiore a quello dei reattori termici e questo comporta per i reattori veloci, un tempo di raddoppiamento minore.

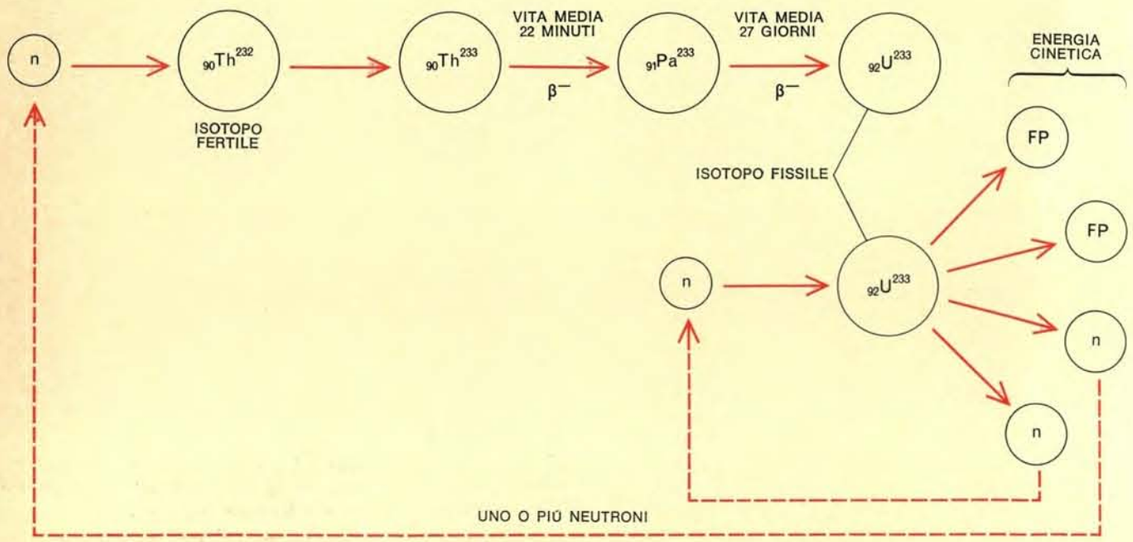
L'idea di un reattore convertitore è praticamente nata con quella della reazione nucleare a catena e subito dopo la II guerra mondiale, vennero studiati molti reattori convertitori, sia termici che veloci. Un'importante caratteristica che differenzia questi due tipi di reattori riguarda il refrigerante impiegato per scambiare il calore prodotto dalla fissione con il sistema generatore di potenza. Fra i refrigeranti proposti tro-

viamo l'acqua e i sali fusi, per i reattori convertitori termici; i gas inerti (quali l'elio), i metalli liquidi (il sodio per esempio) e il vapore acqueo, per quelli veloci.

Negli Stati Uniti e in molte altre nazioni si arrivò ben presto a concludere che i reattori convertitori piú convenienti da realizzare erano quelli veloci raffreddati con metalli fusi che i ricercatori hanno battezzato con la sigla LMFBR (liquid-metal-cooled fast breeder reactor). Poiché la maggior parte degli studi tende a sviluppare tale tipo di reattori, questo articolo è dedicato principalmente ai reattori convertitori veloci a metallo liquido, anche se alcune società industriali hanno allo studio progetti che tendono a utilizzare come refrigerante per questo tipo di reattori l'elio sotto pressione. Negli Stati Uniti sono attualmente in fase di sviluppo due reattori convertitori termici operanti sul ciclo del torio: il reattore ad acqua del Bettis Atomic Power Laboratory e il reattore a sale fuso dell'Oak Ridge National Laboratory.



Il ciclo dell'uranio in un reattore convertitore veloce si avvale per il suo sostentamento di neutroni veloci, cioè altamente energetici. Nel ciclo un atomo di uranio-238 fertile assorbe un neutrone e, dopo aver emesso una particella beta, si trasforma in nettunio, che a sua volta, in seguito a un secondo decadimento beta, si trasforma in un elemento fissile, il plutonio-239. Quando un atomo di plutonio-239 assorbe un neutrone, si disintegra, liberando una certa quantità di energia, dei prodotti di fissione (*FP*) e almeno due neutroni. Uno dei due neutroni viene utilizzato per continuare la reazione a catena, mentre l'altro o gli altri sono disponibili per la trasformazione di un isotopo fertile in uno fissile, permettendo la conversione del combustibile. In alcuni anni un reattore convertitore è in grado di raddoppiare la quantità originaria di combustibile.



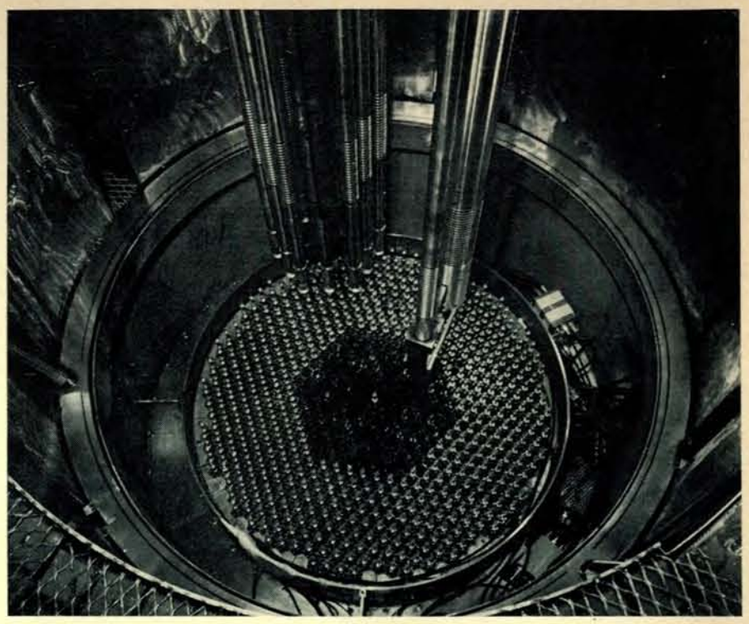
Il ciclo del torio di un reattore convertitore è del tutto simile a quello dell'uranio, a eccezione del fatto che questo ciclo trova migliore applicazione in un reattore termico, cioè in un reattore che funzioni con neutroni termici, cioè con neutroni relativamente lenti. In questo ciclo l'isotopo fertile che si trasforma prima in protoattinio e poi in uranio-233 è il torio-232.

I reattori convertitori veloci refrigerati a metallo liquido presentano alcune interessanti caratteristiche. Il *nocciolo* (core) di un reattore veloce può essere molto piccolo; per ragioni economiche il reattore deve funzionare con una densità di potenza superiore rispetto a quella dei reattori a fissione convenzionali. Il volume attivo del nocciolo, di soli pochi metri cubi, è grosso modo proporzionale alla energia che è in grado di fornire e la sua densità di potenza è circa di 0,4 megawatt al litro.

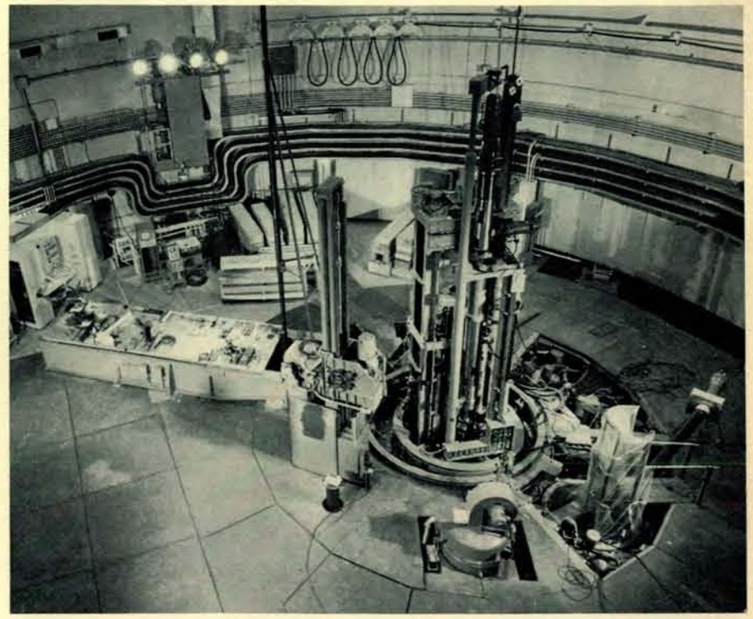
Per dissipare il calore durante il funzionamento e per mantenere il combustibile a una temperatura accettabile, il sodio impiegato come refrigerante deve quindi fluire attraverso il nocciolo con una velocità di decine di migliaia di metri cubi all'ora. Per permettere la circolazione del sodio il combustibile viene suddiviso in migliaia di sottili sbarre verticali, racchiuse in un contenitore di acciaio o di altra lega resistente alle alte temperature.

Il combustibile è utilizzato preferibilmente come ossido o carburo sotto forma di ceramica, poiché questa è stabile anche dopo lunghe esposizioni alle radiazioni e alle alte temperature, presenta una temperatura di fusione molto elevata ed è relativamente inerte ai metalli liquidi. I componenti del combustibile nucleare possono essere l'uranio-235 arricchito, il plutonio-239 o una miscela dei due. Normalmente il combustibile viene diluito con uranio-238, in modo che una parte della conversione avvenga nel nocciolo del reattore. L'uranio-238, presente nel nocciolo del reattore, contribuisce anche al sistema di sicurezza, come spiegheremo piú avanti con maggiori dettagli. Per ottenere la massima economia e le migliori prestazioni il combustibile deve non solo poter sopportare irradiazioni neutroniche molto superiori a quelle che si hanno nei normali reattori nucleari, ma il suo consumo fra due successivi cicli deve essere almeno doppio di quello che si ha nei reattori convenzionali. Per realizzare un simile combustibile occorre sperimentare nei reattori varie combinazioni di elementi poiché proprio il raggiungimento di queste caratteristiche condiziona il successo del programma di ricerca sui reattori convertitori.

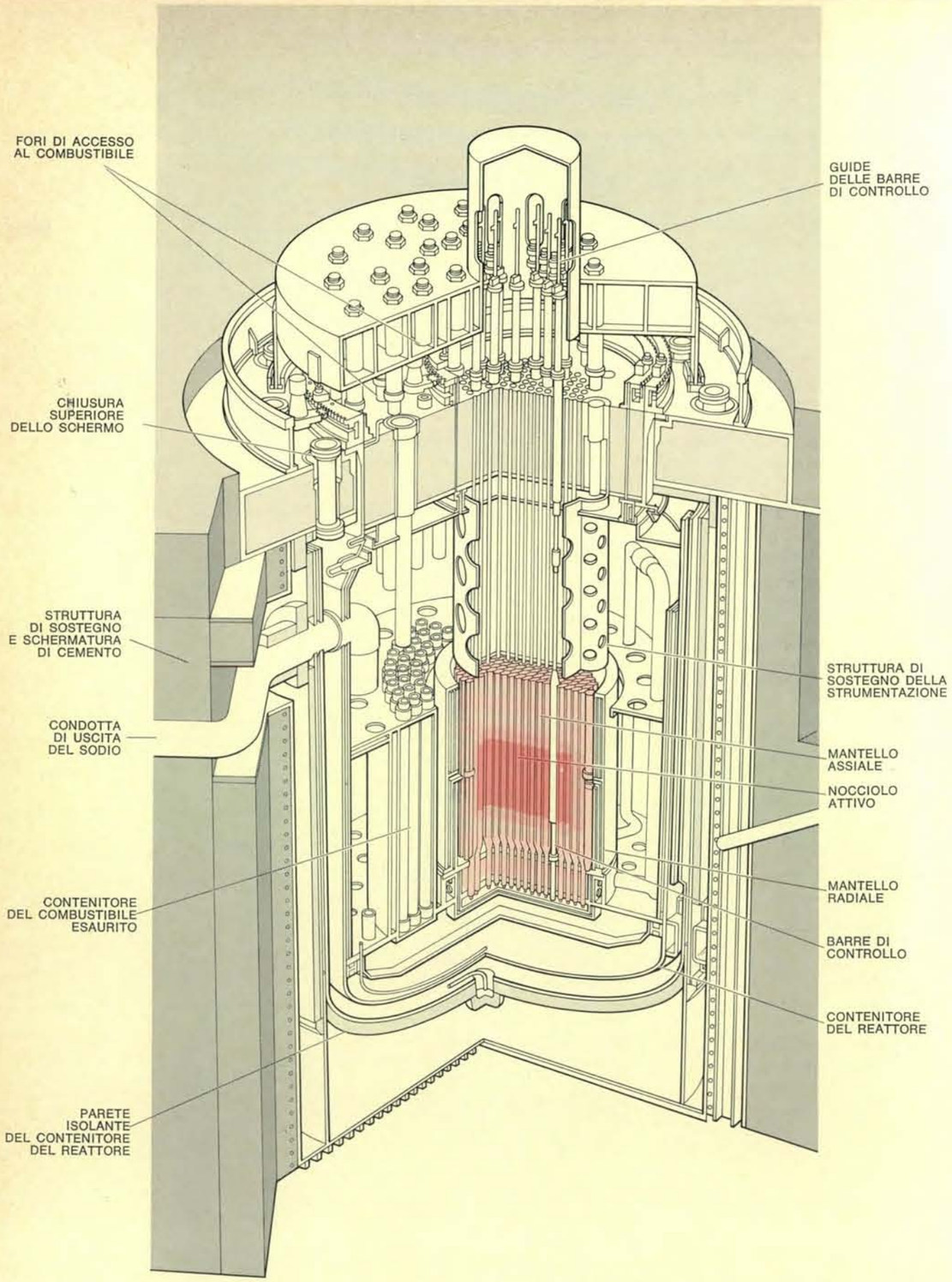
Una seconda importante caratteristica dei reattori convertitori veloci è rappresentata dalla presenza del *mantello* che circonda il nocciolo. Dato che la maggior parte della conversione av-



Il nocciolo e il mantello di un reattore convertitore veloce, nella foto si vede l'Experimental Breeder Reactor II, sono il centro vitale delle operazioni di conversione. L'area esagonale scura è il nocciolo, nel quale gli elementi di combustibile vengono introdotti o rimossi per mezzo del sistema meccanico visibile sulla destra della parte centrale della foto. Il raggruppamento di sbarre che si vede a sinistra è collegato invece alle barre di controllo del nocciolo. Attorno al nocciolo vi è la parte superiore del mantello costituito da tubi con uranio-238 che verrà poi trasformato in plutonio.



L'Experimental Breeder Reactor II che opera sotto il controllo della US Atomic Energy Commission presso la National Reactor Testing Station nell'Idaho. I componenti primari del reattore nucleare si trovano sotto il piano del pavimento in un involucro cilindrico di circa 7 metri di diametro per 7 metri di altezza, contenente anche il refrigerante sotto forma di sodio liquido. A destra nella foto si può vedere la torre che contiene il sistema meccanico per il movimento delle barre di controllo per la manipolazione degli elementi di combustibile all'interno del reattore. Questo reattore viene usato per studi sui materiali impiegati nella costruzione dei reattori convertitori.



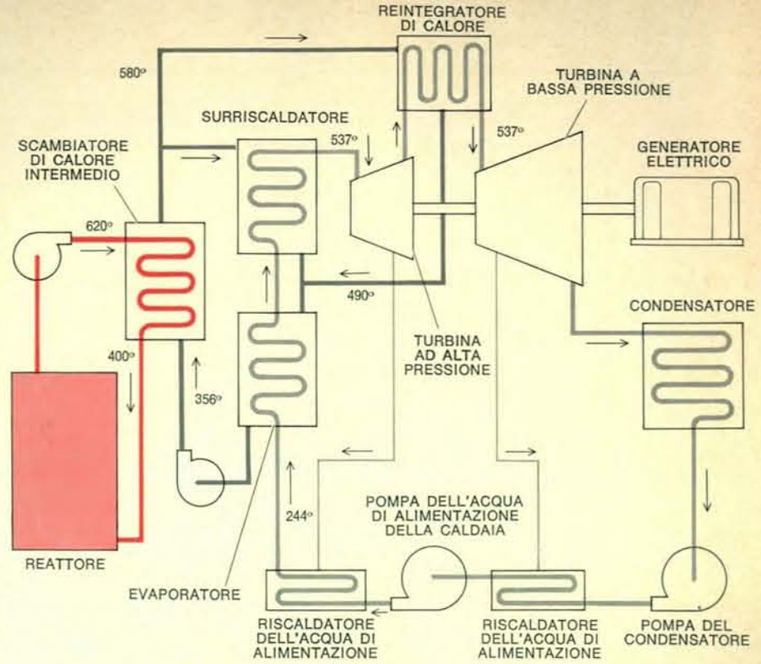
In questo disegno è rappresentato lo spaccato di un reattore convertitore veloce a metallo liquido che servirà come prototipo e potrà produrre circa 500 megawatt di potenza elettrica. L'impianto commerciale, la cui entrata in funzione è prevista per il 1984, si avvarrà degli studi effettuati su questo modello, e potrà fornire una potenza di circa 1000 megawatt. Il progetto è del tipo a ricircolo. In esso, il reattore vero e proprio, contenuto in un grosso involucro riempito di sodio liquido, è separato dallo scambiatore di calore e dalle pompe alle quali è collegato da condotti per il sodio che funge da refrigerante.

viene in questa zona, il mantello è costituito da uranio-238 racchiuso in tubi di acciaio inossidabile. (Questo può essere l'uranio impoverito dell'isotopo 235, ottenuto come residuo del processo di arricchimento operato per produrre uranio-235 da usare come combustibile per i reattori nucleari; sono attualmente disponibili grandi quantità di questo uranio impoverito). Poiché nel mantello avvengono un certo numero di fissioni, esso deve essere raffreddato per mezzo di un flusso di sodio liquido. Il mantello ha però un'altra importante funzione: esso non cattura tutti i neutroni che lo raggiungono, ma ne riflette gran parte verso il nocciolo del reattore, aumentando cosí l'economia neutronica generale.

Il sodio impiegato come refrigerante è anche un ottimo trasferitore di calore e ha inoltre il vantaggio di poter essere impiegato a bassa pressione anche se esce dal reattore a una temperatura (superiore a 500 gradi centigradi) che, impiegando acqua, darebbe origine a pressioni elevatissime e a problemi di difficile soluzione. La pressione del sodio infatti deriva solamente dalle forze che sono richieste per mantenere un'alta velocità di scorrimento fra i tubi presenti nel nocciolo e nel mantello del reattore. Paragonato ad altri refrigeranti, quali l'acqua e i gas, il sodio richiede basse potenze di pompaggio e non risulta particolarmente corrosivo per il reattore.

Il sodio presenta però alcuni svantaggi che influenzano notevolmente la realizzazione di un simile reattore. Poiché il sodio è opaco, si deve tener presente che non è possibile un'osservazione diretta durante le operazioni di manutenzione e di ricarica del combustibile. Il sodio inoltre è chimicamente molto reattivo, e diventa altamente radioattivo dopo una esposizione ai neutroni, anche se la sua sezione d'urto, o capacità di assorbimento di neutroni, è relativamente bassa. Di conseguenza il sodio deve essere mantenuto isolato dall'aria e dall'acqua, e si devono impiegare schermi biologici per proteggere gli operatori che devono lavorare vicino al sodio che è fluito attraverso il nocciolo e il mantello di un reattore durante il suo funzionamento.

Nella regione del nocciolo sono predisposte numerose barre di guardia e di controllo. Il loro compito è quello di mantenere la potenza di uscita al giusto livello e di permettere l'avviamento e lo spegnimento della reazione nel reattore. Queste barre sono costruite con materiali capaci di assorbire i neutroni, come il carburo di boro o il tantalio metallico.



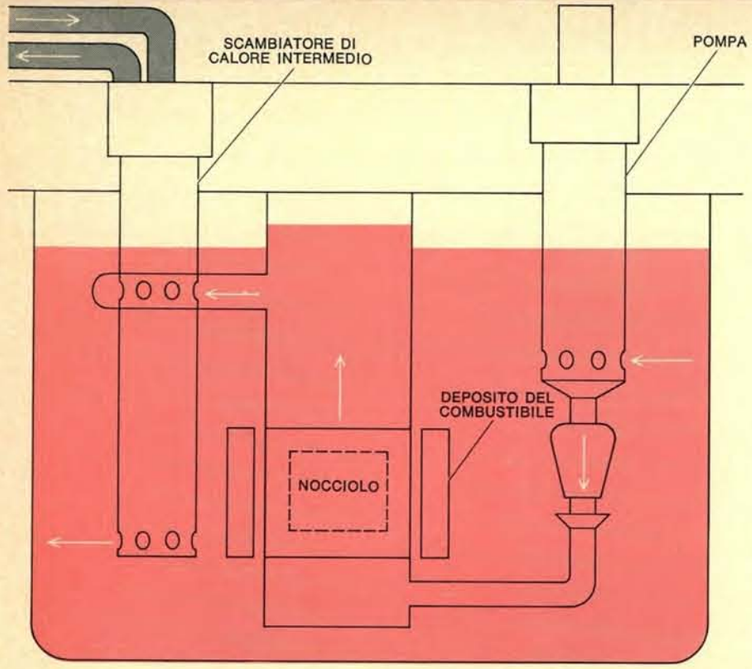
Il sistema di trasmissione termica di un reattore convertitore veloce a metallo liquido. Le pompe fanno circolare nel reattore, dove diviene radioattivo, il refrigerante costituito da sodio liquido (*linee colorate*), successivamente esso passa in uno scambiatore di calore intermedio, nel quale il calore viene trasferito a un sistema di trasmissione indipendente e separato dal precedente ma avente come refrigerante sodio non radioattivo (*grigio scuro*). Questo circuito trasferisce il calore a un circuito termico che viene impiegato per produrre elettricità e che funziona ad acqua e vapore (*grigio chiaro*). I valori numerici nello schema indicano la temperatura in gradi centigradi.

Tutte le sostanze presentano un coefficiente di assorbimento per i neutroni veloci molto piú basso di quello che hanno i neutroni termici. Questa sezione d'urto piú bassa fa si che, a parità di dimensioni, le barre di controllo risultino meno efficienti nei reattori veloci che non in quelli termici. D'altra parte, nel nocciolo di un reattore termico è presente una grande quantità di combustibile in eccesso, il cui scopo è quello di integrare il combustibile consumato nella fissione e di compensare l'effetto avvelenante dei prodotti di fissione (i prodotti di fissione catturano neutroni producendo una quantità di energia insignificante). Ma con una maggiore quantità di combustibile è indispensabile esercitare anche un maggiore controllo. I reattori convertitori veloci richiedono un minor numero di barre di controllo dato che la loro maggiore efficienza nel convertire l'uranio-238 in plutonio-239 fissile compensa la minore quantità di combustibile iniziale e anche perché i neutroni veloci non sono assorbiti dai prodotti di fissione come i neutroni termici.

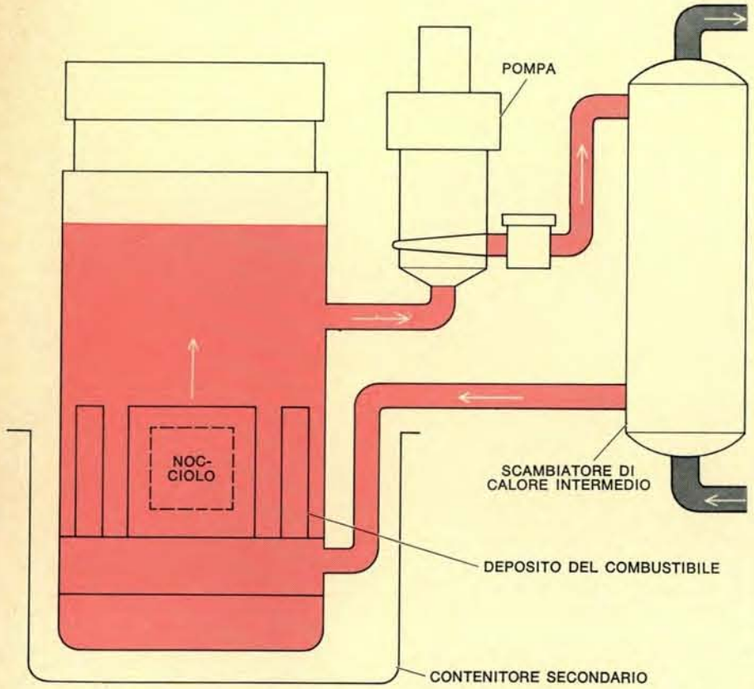
Durante la fissione non tutti i neutroni vengono liberati nell'istante nel quale il nucleo si disintegra, ma una piccola percentuale di essi viene emessa in seguito al decadimento dei prodotti di fissione. Si possono quindi distinguere dei neutroni ritardati rispetto ai neutroni *immediati* emessi direttamente dai nuclei durante la loro fissione. Sono quindi i neutroni ritardati che impediscono che la reazione si propaghi in modo istantaneo da una generazione di neutroni alla successiva.

La percentuale di neutroni ritardati dipende in modo sostanziale dal tipo di nucleo sottoposto alla fissione. La maggior parte dei reattori termici è alimentata con uranio-235, mentre i reattori convertitori veloci saranno alimentati con plutonio-239. La percentuale di neutroni ritardati prodotti in seguito alla fissione dell'uranio-235 è di circa lo 0,65 % mentre per il plutonio-239 tale percentuale è dello 0,3 %. In condizioni di funzionamento normale la minore percentuale di neutroni ritardati presenti in un reattore veloce non dà eccessive preoccupazioni.

Attualmente sono allo studio due diverse soluzioni per il montaggio dell'insieme nocciolo-mantello e del sistema primario di trasferimento termico: il tipo a immersione e il tipo a



Il sistema a immersione prevede un unico contenitore che racchiude in sé l'insieme nocciolo-mantello di un reattore e lo scambiatore di calore primario. Nel contenitore, riempito di sodio, trovano posto il reattore, le pompe che convogliano il sodio nel reattore e lo scambiatore di calore, che trasferisce il calore al sodio non radioattivo.



Nel sistema a ricircolo lo scambiatore di calore è all'esterno del contenitore del reattore. Il sodio che riempie solamente il contenitore del reattore viene fatto circolare da una pompa nel circuito dello scambiatore di calore, esterno al reattore. La tecnologia dei reattori convertitori studia entrambi i principi schematizzati in queste figure.

ricircolo (*si vedano le figure qui accanto*). Nel tipo a immersione un grosso serbatoio riempito di sodio contiene 1) il reattore vero e proprio, 2) la pompa che preleva il sodio dallo stesso serbatoio e lo convoglia nel nocciolo e nel mantello e 3) uno scambiatore di calore intermedio che trasferisce il calore dal sodio radioattivo a un secondo circuito funzionante anche esso a sodio. Nel tipo a ricircolo solo il contenitore del reattore è riempito con sodio e il metallo liquido viene fatto circolare per mezzo di una pompa nello scambiatore di calore montato all'esterno del contenitore del reattore. Il sistema a immersione ha il vantaggio di presentare una capacità termica molto grande nel caso si manifesti un guasto nel sistema di pompaggio, ma naturalmente richiede una quantità assai maggiore di sodio.

Sia nel sistema a immersione che nel sistema a ricircolo, il reattore convertitore veloce a metallo liquido richiede uno scambiatore di calore molto complesso per isolare il sodio che fluisce nel nocciolo dal generatore di vapore. A questo provvede uno scambiatore di calore intermedio. Esso trasferisce il calore dal sodio radioattivo al sodio non radioattivo che a sua volta viene fatto fluire nel generatore di vapore. Per surriscaldare il vapore e per riinnalzarne la temperatura dopo ogni passaggio nella turbina, si impiegano circuiti sussidiari al sodio.

In entrambi i sistemi, a immersione o a ricircolo, è necessario che parte della struttura, che risulta essere in diretto contatto con il nocciolo radioattivo e con il mantello, sia a perfetta tenuta. Nelle normali operazioni non devono esserci in modo assoluto delle perdite o delle dispersioni di prodotti di fissione radioattivi nell'ambiente esterno. A causa della bassa pressione propria del sistema di refrigerazione al sodio, il contenitore del reattore e le relative condutture possono essere progettate per sopportare solo carichi moderati, diversamente da quanto avviene per i contenitori a pressione e per gli altri componenti dei sistemi primari dei reattori che impiegano come refrigeranti acqua in pressione, acqua bollente o gas.

Attualmente sembra che il sistema a immersione sia il piú interessante. Esso è indubbiamente meno complesso del sistema a ricircolo, tuttavia non è privo di inconvenienti uno dei quali è senza dubbio la scarsa accessibilità al reattore per la manutenzione.

Il reattore convertitore veloce refrigerato a gas sta destando un certo interesse (anche se non eccessivo) come sistema parallelo e complementare di quello refrigerato a metallo liquido. Poiché i reattori termici a refrigerante gassoso esistono e funzionano in modo soddisfacente, un reattore convertitore veloce a refrigerante gassoso non dovrebbe presentare grossi inconvenienti tecnici per quanto riguarda il sistema di refrigerazione. Le caratteristiche richieste e le prove cui deve essere sottoposto il combustibile di un reattore veloce a refrigerazione gassosa presentano molte analogie con quelle già studiate per il combustibile dei reattori convertitori veloci a metallo liquido.

La principale differenza fra i due tipi di reattori è che il tipo a refrigerazione gassosa, invece del sodio fuso, impiega l'elio a una pressione variabile fra 70 e 100 atmosfere per trasferire il calore dal nocciolo del reattore al generatore di vapore. Poiché il gas non diventa radioattivo e non reagisce chimicamente con l'acqua del generatore di vapore, non c'è la necessità di inserire uno scambiatore di calore intermedio. Questa semplificazione è oltremodo vantaggiosa e bilancia la maggior complessità di progettazione derivante dalla maggiore pressione di esercizio di un impianto a refrigerazione gassosa.

Ma l'impiego dell'elio come refrigerante presenta ulteriori vantaggi. Esso infatti non reagisce con i neutroni veloci nel nocciolo del reattore e aumenta la produzione di nuovi elementi fissili da parte di nuclei fertili. Inoltre l'elio è trasparente e chimicamente inerte; ciò consente di eseguire le operazioni di ricarica del combustibile e di manutenzione in visione diretta e permette una maggiore semplicità nella progettazione eliminando qualsiasi fenomeno di corrosione.

In un reattore convertitore veloce a refrigerante gassoso, il nocciolo, il sistema di circolazione di elio e il generatore di vapore, sono tutti contenuti in un involucro a tenuta costruito in cemento armato precompresso. Questo contenitore è simile a quello di un reattore termico refrigerato a gas.

Lo sviluppo di un reattore convertitore veloce refrigerato a gas potrà apportare nuove sostanziali conoscenze oltre a quelle che saranno acquisite per mezzo dei reattori convertitori a metallo liquido. Nell'elio i neutroni vengono rallentati molto meno di quanto non lo siano nel sodio e di conseguenza il tempo di raddoppiamento risulta minore. È inoltre possibile prevedere che in un reattore convertitore veloce a refrigerazione gassosa si possa sviluppare un sistema a ciclo diretto nel quale il gas refrigerante fluisca direttamente dal reattore nella turbina a gas che muove il generatore elettrico. Questo sistema potrebbe aiutare a ridurre l'elevato costo dei convertitori veloci.

Il programma di ricerca della US Atomic Energy Commission per i reattori convertitori veloci a metallo liquido viene essenzialmente sviluppato presso tre grossi reattori, due dei quali sono già operanti: l'Experimental Breeder Reactor II (EBR II) e lo Zero Power Plutonium Reactor (ZPPR).

L'EBR II è un reattore sperimentale a neutroni veloci funzionante presso la National Reactor Testing Station dell'Idaho e gestito dall'Argonne National Laboratory. Questo reattore, che al 1 luglio vantava un record di piú di 35 000 megawatt-giorno di funzionamento, è il punto focale del programma di ricerca sui combustibili per i reattori convertitori veloci a metallo liquido. A tutt'oggi sono state irradiate nel reattore piú di 800 barre di combustibili sperimentali e piú di 100 capsule contenenti centinaia di campioni di materiali strutturali, di controllo e di schermo. L'EBR II ha raggiunto l'anno scorso la potenza di progettazione di 62,5 megawatt (termici).

L'Argonne National Laboratory ha fatto entrare in funzione l'anno scorso anche lo ZPPR (zero power o potenza zero significa in questo caso che il reattore non deve produrre una quantità significativa di calore). Questo reattore è il reattore veloce di potenza zero piú grande d'America e il solo nel mondo sufficientemente grosso e ricco di plutonio (almeno 3000 chilogrammi) da rappresentare un modello in dimensioni reali del sistema a combustibile al plutonio che sarà impiegato nei grandi reattori convertitori che saranno costruiti entro il 1980 e negli anni successivi. Questo reattore fornirà importanti informazioni sul comportamento dei neutroni nel nocciolo dei convertitori.

Il terzo reattore, ora in fase di progettazione, sfrutta le conoscenze ottenute da EBR II, da ZPPR e da altri reattori piú piccoli. Questo reattore, chiamato Fast Flux Test Facility, funzionerà con flussi di neutroni molto elevati e sarà in grado di collaudare e di sperimentare i combustibili e i materiali strutturali che dovranno essere impiegati nei reattori convertitori commerciali. Il reattore, che verrà a costare circa 100 milioni di dollari, funzionerà a una potenza di 400 megawatt (termici) che non verranno però convertiti in energia elettrica. Il reattore verrà costruito a Richland sotto l'egida della Atomic Energy Commission; la sua costruzione inizierà quest'anno e la massima potenza sarà raggiunta presumibilmente intorno al 1974-75.

Lo sviluppo dei reattori termici ha permesso di acquistare molte nuove conoscenze sulla base delle quali la commissione ha incominciato a muovere i primi passi verso la costruzione di diversi impianti sperimentali di reattori convertitori veloci a metallo liquido. La spesa sarà sostenuta dal governo e dall'industria americana. Il primo di questi impianti, con una capacità da 300 a 500 megawatt (elettrici), permetterà di accumulare una valida esperienza sia sul reattore che sul sistema di conversione di potenza. Questo impianto, da un punto di vista economico, non sarà competitivo con gli impianti termoelettrici o con quelli nucleari ora esistenti, sia a causa delle sue dimensioni relativamente piccole, sia perché si troverà al primo stadio di sviluppo. I reattori convertitori veloci a metallo liquido che potranno entrare in funzione nel 1980 saranno in grado di fornire 1000 o piú megawatt di potenza elettrica.

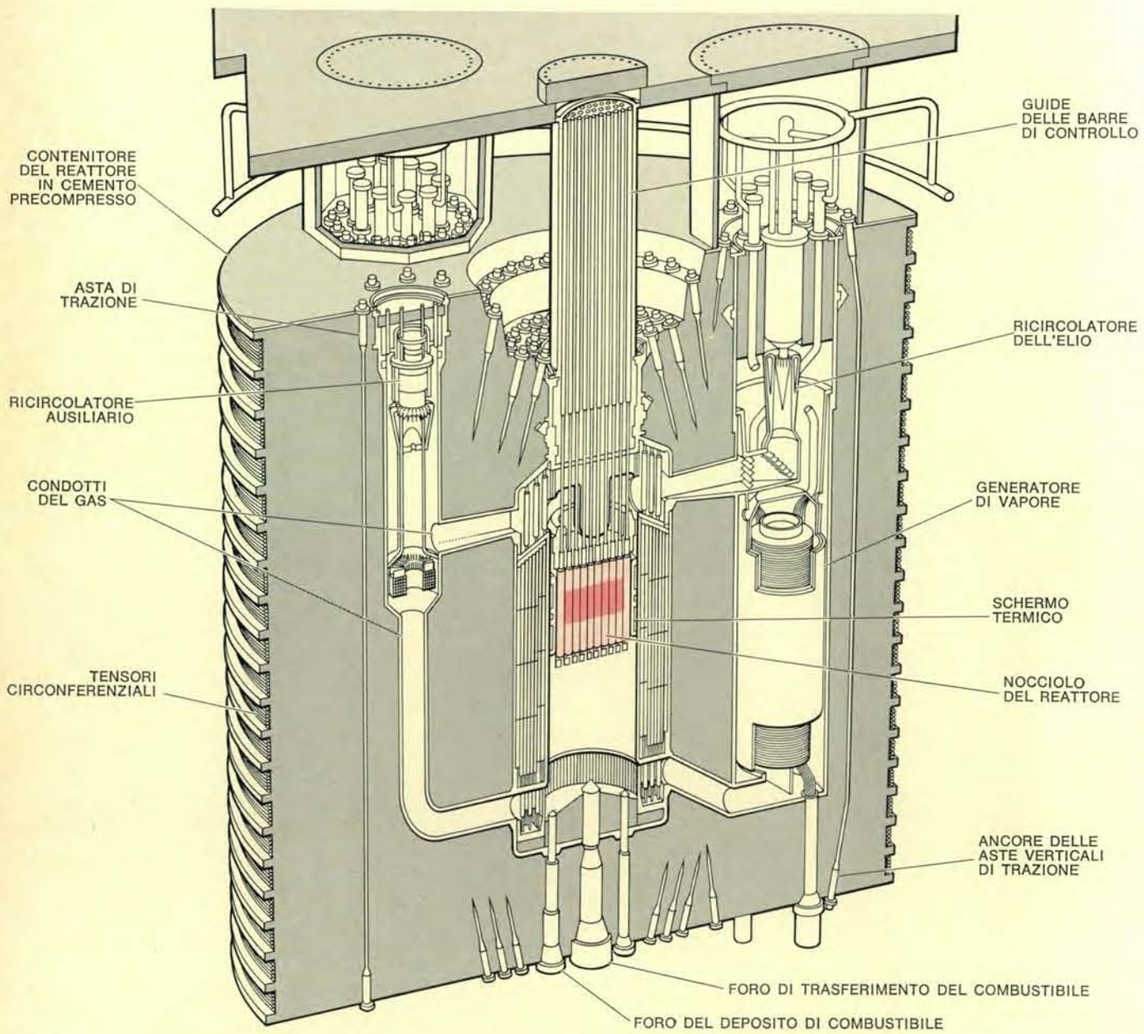
Nel programma di sviluppo di un reattore convertitore veloce è necessario fare alcune considerazioni sui problemi della sicurezza. I prodotti di scarto della fissione sono costituiti da elementi che hanno collocazione nella parte centrale della tavola degli elementi e che derivano dalla fissione degli atomi di combustibile; molti isotopi di questi elementi sono radioattivi. Fin dai primi anni di sviluppo dei reattori è stata subito evidente la necessità di un continuo controllo dei prodotti di fissione, controllo che deve essere effettuato anche nel ciclo del combustibile. Nei reattori convertitori, oltre ai prodotti di fissione, è presente anche una grande quantità di plutonio, che in certe forme è radiologicamente tossico. La procedura seguita, sia nei reattori termici che in quelli veloci, consiste nel racchiudere tutte le sostanze potenzialmente dannose in un involucro a tenuta in grado di resistere a qualsiasi evento improvviso, compresi i terremoti.

Forse il sistema di sicurezza piú importante è rappresentato dal fatto che i reattori nucleari commerciali sono autoregolati, nel senso che essi sono progettati per compensarsi automaticamente nel caso che un qualsiasi inconveniente possa portare a un aumento indesiderato e incontrollato della potenza prodotta. Nei reattori ad acqua questa compensazione è ottenuta sfruttando la diminuzione della densità dell'acqua all'aumentare della sua temperatura. Nei reattori veloci la variazione di densità del refrigerante può portare invece a un effetto controproducente, cioè a un aumento di reattività.

Nei reattori convertitori veloci la compensazione è ottenuta quindi sfruttando l'effetto Doppler, che provoca un aumento della velocità di assorbimento dei neutroni da parte dell'uranio-238 allorquando nel nocciolo del reattore aumenta la temperatura del combustibile. Poiché un improvviso aumento di potenza è necessariamente accompagnato da un aumento di temperatura del combustibile, si manifesterà un aumento dell'assorbimento neutronico e conseguentemente si avrà una tendenza verso una riduzione della potenza sviluppata. Per misurare questi effetti in condizioni analoghe a quelle che si verificano in un grande reattore di potenza, è stato costruito nell'Arkansas, con capitale privato, un piccolo reattore veloce con refrigerante al sodio. A questo programma di studio è stato dato il nome Southwest Experimental Fast Oxide Reactor.

Il fatto che una diminuzione della densità o del volume del refrigerante comporti un aumento della reattività, porta ad altre considerazioni sul problema della sicurezza dei reattori veloci refrigerati al sodio. Se per esempio si venisse a formare una bolla di gas o di vuoto per la quale una zona del nocciolo potrebbe surriscaldarsi in modo incontrollato, alcune barre di combustibile potrebbero presentare pericolosi indebolimenti che darebbero luogo a ulteriori disturbi, e una serie consecutiva di tali eventi non porterebbe necessariamente a uno spegnimento automatico del reattore. Per questo è necessario evitare, già in fase di progetto, la propagazione di tali inconvenienti alle barre di combustibile.

Questo controllo può essere effettuato con tecniche diverse. Per esempio, l'aggiunta di un moderatore quale l'ossido di berillio, aumenta l'efficenza dell'effetto Doppler sui neutroni, mentre gli effetti di vuoto possono essere ridotti variando il rapporto tra refrigerante e combustibile. Altri metodi ancora si basano sul criterio di distribuzione delle barre di combustibile che possono essere sistemate in modo tale da ridurre la potenziale reattività dei vuoti di refrigerante aumentando il numero di neutroni perduti dal nocciolo.



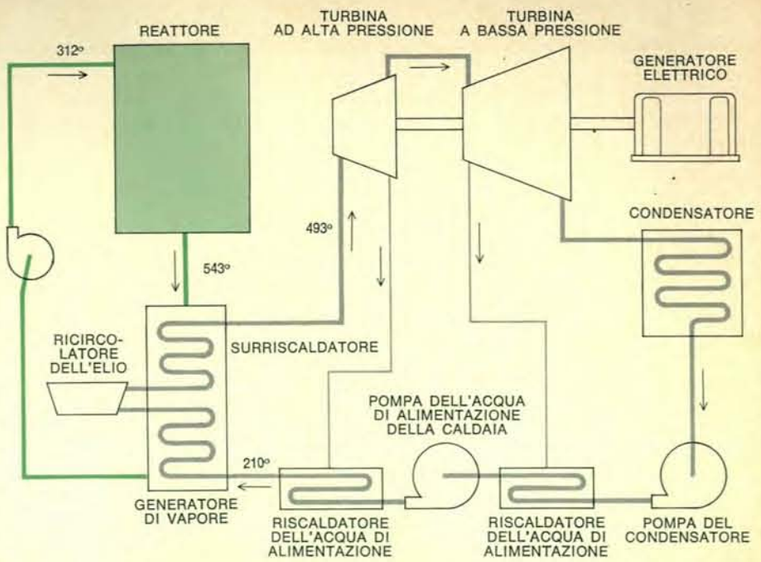
Nel disegno è raffigurato lo spaccato di un reattore refrigerato a gas, con potenza elettrica di 300 megawatt, costruito per le ricerche sul processo di conversione. La differenza principale fra questo tipo di reattore e quello refrigerato a metallo liquido consiste nel fatto che in questo caso il refrigerante è elio ad alta pressione invece di sodio liquido. Per sopportare l'elevata pressione l'intero complesso del reattore è contenuto all'interno di un contenitore di cemento armato precompresso.

In un reattore veloce refrigerato a gas non esistono ovviamente problemi di vuoti dato che nel gas non è possibile la formazione di bolle. È tuttavia necessario tener conto di altre eventualità come improvvisi cali di pressione del gas dovuti a incrinature del contenitore a pressione. L'impiego di contenitori di cemento armato precompresso minimizza tuttavia la possibilità di questi inconvenienti.

Una volta sicuri che in condizioni normali di funzionamento le perturbazioni non si autoesaltino, è necessario prendere in esame gli altri problemi. Il primo consiste nella possibilità di arresto del sistema di raffreddamento a causa di un blocco meccanico. Simili incidenti sono già capitati, ma è chiaro che essi diventano meno frequenti man mano che si acquista una esperienza tecnica specifica in materia. In caso di simili incidenti si evita la fuoriuscita di quantità significative di prodotti di fissione impiegando piú contenitori strutturali concentrici per l'intero sistema del reattore.

Un altro incidente potrebbe essere provocato da un aumento di potenza in un punto dove il calore viene prodotto con un ritmo superiore a quello con cui viene asportato dal refrigerante. Un incidente di questo tipo è accaduto all'EBR I alcuni anni fa. Anche in questo caso un miglioramento del progetto può eliminare l'inconveniente. Per ogni tipo di incidente, anche se molto improbabile, si devono prevedere opportuni accorgimenti strutturali al fine di ridurre al minimo i possibili danni.

Nella progettazione di un reattore convertitore veloce si devono anche prendere in considerazione i fattori ambientali. Poiché i reattori convertitori veloci funzioneranno a temperature molto piú alte di quelle che si sono finora avute con i reattori refrigeranti ad acqua, essi dovranno presentare efficenze termodinamiche molto piú elevate. Oggigiorno i reattori ad acqua funzionano con una efficenza di circa il 32 %, cioè il 32 % dell'energia termica prodotta viene convertita in energia elettrica, mentre gli impianti termoelettrici a combustibile fossile hanno un'efficenza del 39 %. I reattori ad acqua forniscono quindi all'ambiente, per dispersione, una quantità di calore per unità di energia elettrica prodotta, maggiore di quella dispersa da un impianto a combustibile fossile. I reattori veloci raggiungeranno probabilmente efficienze uguali a quelle dei piú moderni impianti a combustibile fossile, riducendo in questo modo il problema delle dispersioni di calore dovute a effetti nucleari.



Lo schema del circuito di refrigerazione di un reattore convertitore veloce refrigerato a gas comprende il sistema di trasferimento termico del refrigerante a elio (*colorato*) al sistema a vapore acqueo (*grigio*). Il sistema non ha uno scambiatore di calore intermedio. I valori numerici riportati in figura indicano le temperature in gradi centigradi.

L'immissione di radioattività nell'aria da parte di questi reattori è molto prossima a zero. Anche la piccola percentuale di radioattività dovuta ai gas dei prodotti di fissione (principalmente cripto-85 e tritio) dispersa attualmente in condizioni controllate dai reattori refrigerati ad acqua, verrà a essere eliminata. Infatti, poiché il contenitore racchiude il nocciolo ermeticamente, esso stesso costituirà un sistema efficente per la raccolta e l'immagazzinamento dei gas, che non potranno quindi costituire un pericolo. Inoltre, poiché il refrigerante in un reattore convertitore veloce è mantenuto in un contenitore sigillato, e poiché l'acqua impiegata per generare il vapore non è esposta ai neutroni, non si avrà formazione radioattiva negli scarichi liquidi provenienti dall'impianto nucleare.

Il vantaggio economico dei reattori convertitori veloci sta principalmente, ma non interamente, nel fatto che essi permettono un risparmio di combustibile nucleare. Nei prossimi 50 anni l'impiego dei reattori convertitori potrà, secondo le attuali previsioni, ridurre di 1,2 milioni di tonnellate la quantità di uranio che verrebbe consumata qualora si impiegassero reattori normali. Questa quantità è equivalente a circa 3 miliardi di tonnellate di carbone.

Lo sviluppo dell'economia di un reattore convertitore dovrebbe inoltre portare a un guadagno finanziario diretto di grandi proporzioni. Gli studi ora condotti hanno indicato che la spesa per la ricerca e lo sviluppo dei reattori convertitori veloci a metallo liquido supererà entro il 2020, per la sola US Atomic Energy Commission, i 2 miliardi di dollari, senza considerare molte altre spese industriali. Se il primo reattore convertitore commerciale entrerà in funzione, secondo i programmi, nel 1984, la riduzione nella spesa per la produzione di energia elettrica negli anni seguenti (fino al 2020) può essere valutata in 200 miliardi di dollari.

L'attuale costo per la produzione di energia elettrica negli Stati Uniti varia da 5 a 10 millesimi di dollaro per chilowattora all'uscita della centrale elettrica, a seconda del tipo, dell'età e dell'ubicazione dell'impianto di produzione. Praticamente tutti gli impianti rientrano in questi limiti di costi. Il reattore convertitore veloce dovrebbe invece produrre energia elettrica con un costo compreso fra 0,5 e 1 millesimo di dollaro per chilowattora. I sistemi di grossi reattori convertitori capaci di abbassare il costo dell'energia elettrica sotto i 2 millesimi di dollaro per chilowattora renderanno possibile l'estrazione, l'uso e la riutilizzazione delle risorse naturali in modo oggi impensabile.

L'attività genetica dei mitocondri e dei cloroplasti

Questi organelli cellulari, che contengono DNA e RNA, sono capaci di sintetizzare le proteine. La loro organizzazione fa ritenere che possano aver avuto origine da organismi indipendenti simili ai batteri

di Ursula W. Goodenough e R. P. Levine

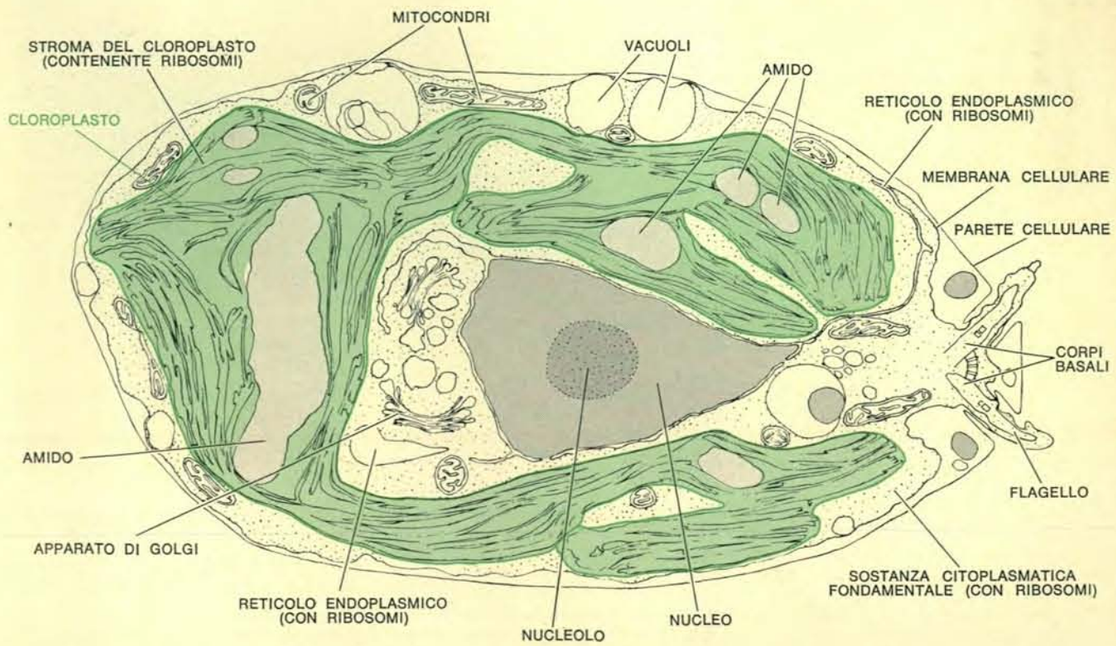
La genetica della cellula vivente è piú complessa di quanto possa apparire da una concisa definizione. Infatti si usa dire che il DNA, la struttura a doppia elica, che si trova nel nucleo di ogni cellula vegetale e animale, contiene la completa matrice genetica per ricostruire l'intero organismo. Però da un po' di tempo i genetisti hanno riconosciuto che questa affermazione non può essere rigorosamente vera, giacché il citoplasma (la regione non nucleare) di tutte le cellule vegetali e animali contiene certi organelli, o strutture subcellulari, che possiedono un loro DNA. Un organello del genere, il mitocondrio, si trova nelle cellule di tutte le piante e di tutti gli animali; ai mitocondri è dovuto l'accumulo di energia sotto forma di adenosintrifosfato (ATP) e la produzione di una varietà di altre piccole molecole essenziali. Un altro organello contenente DNA, il cloroplasto, si trova soltanto nelle alghe e nelle piante superiori. I cloroplasti contengono clorofilla e simili pigmenti per catturare l'energia della luce solare e produrre carboidrati mediante la fotosintesi. Durante questo processo anche i cloroplasti producono ATP. Di tanto in tanto c'è chi descrive la presenza di DNA anche in altri organelli ma, anche se questo verrà confermato, i mitocondri e i cloroplasti probabilmente rimarranno unici in quanto contengono non solo acidi nucleici (DNA e RNA), ma sono anche in grado di sintetizzare alcune proteine. Una ipotesi affascinante è che i mitocondri e i cloroplasti, presenti oggi nelle cellule vegetali e animali, una volta fossero organismi indipendenti, parenti alla lontana degli odierni batteri, che vennero incorporati in cellule piú grandi divenendo endosimbionti durante il corso dell'evoluzione.

Quando i biologi cellulari del XIX secolo studiarono per la prima volta i mitocondri e i cloroplasti con il microscopio ottico furono colpiti dal loro comportamento chiaramente indipendente all'interno della cellula. Questi organelli spesso si riproducono in momenti in cui la cellula stessa non si divide e, in genere, si sviluppano in grandezza e in complessità funzionale. Per esempio, i precursori dei cloroplasti nei semi delle piante sono minuscoli corpiccioli incolori chiamati proplastidi. Certi proplastidi rimangono nelle radici delle piante e si differenziano in amiloplasti incolori, particelle piene di amido che predominano in alcuni vegetali come nelle patate. Altri proplastidi, quando vengono esposti alla luce, diventano cloroplasti acquistando un complesso sistema di membrane, la clorofilla e i pigmenti carotenoidi essenziali per la fotosintesi (*si veda la figura a pagina 20*). I cloroplasti dei pomodori e simili si differenziano infine in cromoplasti accumulando grandi quantità di carotenoidi rossi (*si veda la figura a pagina 21*). Lo sviluppo strutturale dei mitocondri è generalmente meno vistoso di quello dei cloroplasti, ma con il microscopio elettronico si può seguire la trasformazione dei piccoli mitocondri delle cellule embrionali in organelli assai piú grandi come quelli presenti nel muscolo cardiaco (*si veda la figura in alto a pagina 22*). La crescita e lo sviluppo dei cloroplasti e dei mitocondri sono influenzati da molti fattori. Però quello che ci interessa di piú in questo articolo è come il DNA di questi organelli influenzi la loro struttura e funzione e quanto gli organelli siano sotto il controllo del DNA contenuto nel nucleo.

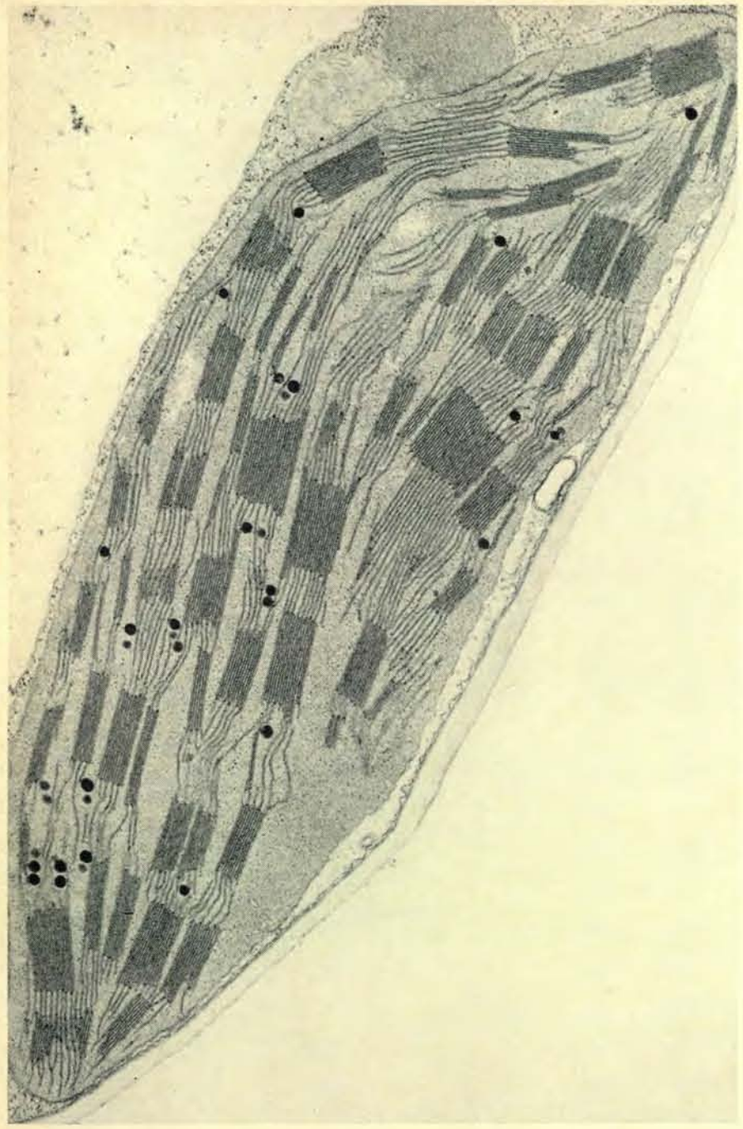
L'acido desossiribonucleico (DNA) e l'acido ribonucleico sono i soli due tipi di molecole capaci di codificare e trasmettere l'informazione genetica. Oltre al DNA i mitocondri e i cloroplasti contengono RNA-polimerasi DNA dipendenti, enzimi che provvedono alla sintesi di vari tipi di RNA. Un tipo, noto come RNA messaggero, trascrive l'informazione genetica del DNA. Altri tipi di RNA sono chiamati RNA di trasferimento (t-RNA) perché « riconoscono » singoli amminoacidi e li dispongono nella precisa sequenza dettata dall'RNA messaggero, per la sintesi di una proteina specifica. Per compiere questa sintesi anche i mitocondri e i cloroplasti possiedono piccole ma complesse particelle, chiamate ribosomi, costituite da almeno due tipi di RNA e da 30 a 50 tipi di proteine. I ribosomi agiscono da supporto per l'RNA messaggero mentre i t-RNA portano gli amminoacidi ai posti loro assegnati. Infatti, se a mitocondri e cloroplasti, isolati dal resto della cellula, vengono forniti i substrati appropriati, essi possono duplicare il loro DNA, sintetizzare nuovo RNA e incorporare amminoacidi per formare proteine. Capacità genetiche comparabili a queste non sono mai state descritte per altri organelli cellulari, quali il reticolo endoplasmico, l'apparato di Golgi, i centrioli, i corpi basali e i gliossisomi (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

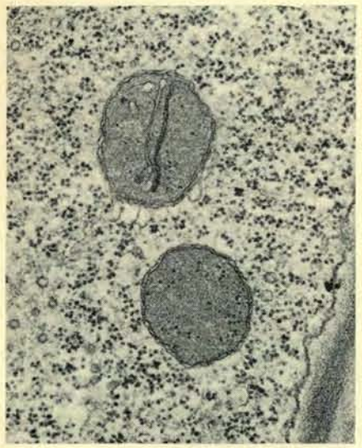
Il fatto che i mitocondri e i cloroplasti compiano funzioni genetiche non sarebbe particolarmente interessante se essi semplicemente utilizzassero pezzi di DNA provenienti dal nucleo mediante ribosomi ed enzimi del citoplasma. Però, non avviene cosí. L'apparato genetico di questi organelli è chiaramente differente da quello presente nel nucleo o nel citoplasma. Un'indicazione di questa differenza si ha dal confronto della composizione chimica del DNA nucleare con quella del DNA mitocondriale. La molecola del DNA consiste in due filamenti appaiati le cui subuni-

L'alga unicellulare *C. reinhardi* possiede sia cloroplasti che mitocondri, due organelli che contengono oltre all'acido desossiribonucleico (DNA) anche l'apparato per la sintesi delle proteine. La cellula, in questa fotografia al microscopio elettronico eseguita da Ursula W. Goodenough, è ingrandita 15 500 volte. I costituenti cellulari sono indicati nella figura qui sotto.



Il cloroplasto di *C. reinhardi* (*area colorata*) è costituito da molte membrane circondate da un rivestimento. I ribosomi, cioè le particelle su cui vengono sintetizzate le proteine, si trovano nello stroma, la fase solubile del cloroplasto. I ribosomi citoplasmatici, sintetizzati nel nucleolo, si trovano nella sostanza citoplasmatica fondamentale, attaccati al reticolo endoplasmico. Sono indicati soltanto due dei numerosi mitocondri. Il vacuolo è una vescicola citoplasmatica circondata da una membrana.





Questo cloroplasto maturo, ingrandito 22 000 volte nella foto in alto, proviene da una foglia della graminacea « coda di topo ». Questi cloroplasti si sviluppano da proplastidi, due dei quali sono fotografati a sinistra, ingranditi 38 000 volte. Questi sono proplastidi di un apice radicale del comune fagiolo, ma la loro semplice struttura è tipica di tutti i proplastidi. Essi contengono alcuni ribosomi sparsi e, in un caso, l'inizio di una ripiegatura della membrana. Nel cloroplasto maturo le membrane sono organizzate in numerose pile chiamate *grana*. I *grana* sono collegati tra loro da altre membrane chiamate lamelle dello stroma. Nello stroma si possono vedere molti cromosomi cloroplastici (*punti neri*). La funzione delle gocce nere, i granuli osmiofili, è sconosciuta. Le fotografie sono state fatte da William Wergin nel laboratorio di Eldon H. Newcomb dell'Università del Wisconsin.

tà, chiamate nucleotidi, sono sempre complementari. Cosí un nucleotide contenente la base adenina (A) si accoppia sempre con uno contenente timina (T); analogamente i nucleotidi contenenti guanina (G) e citosina (C) sono appaiati. Anche se è molto difficile stabilire la sequenza di nucleotidi in un campione di DNA, è abbastanza facile determinare il rapporto delle coppie di nucleotidi. Si è trovato che la percentuale di G piú C nel DNA mitocondriale è in genere abbastanza diversa da quella del DNA nucleare della stessa cellula. In una cellula vegetale il contenuto in G piú C è spesso differente per le tre specie di DNA (nucleare, mitocondriale e cloroplastico) cosí che essi possono essere separati l'uno dall'altro mediante centrifugazione ad alta velocità in un gradiente di densità ottenuto con cloruro di cesio (*si veda la figura in alto a pagina 24*).

A differenza del DNA nucleare, il DNA di questi organelli non si associa con certe proteine chiamate istoni, e quindi si trova nell'organello come una fibra nuda. Nei mitocondri le fibre nude di DNA in genere si chiudono su se stesse formando molecole circolari. Questi anelli non sono ancora stati identificati nei cloroplasti, dove invece il DNA appare sotto forma di ammassi di lunghi filamenti (*si veda la figura in basso a pagina 22*).

Le fibre nude di DNA prive di istoni e spesso di forma circolare, sono tipiche dei cloroplasti e dei mitocondri nelle cellule fornite di nucleo, ma non sono le sole nel regno biologico. Tutti i batteri conosciuti e le alghe azzurre contengono cromosomi che rispondono esattamente a questa descrizione. È questa soltanto una coincidenza? Molti biologi pensano che non lo sia. È stato suggerito che i mitocondri e i cloroplasti siano moderni discendenti delle forme primitive dei batteri o delle alghe azzurre che si insediarono in cellule primitive dove subirono un'evoluzione indipendente. Si suppone che le cellule primitive che avevano come « inquilini » tali batteri e alghe azzurre disponessero di mezzi addizionali per produrre energia e fossero cosí piú avvantaggiati di quelli che non li avevano.

I batteri e le alghe azzurre sono chiamati procarioti, perché mancano di un nucleo delimitato da una membrana, presente invece negli organismi nucleati, chiamati eucarioti (karion in greco significa nucleo). Il DNA dei batteri e delle alghe è situato in « nucleoidi » che si trovano anche nei mitocondri e nei cloroplasti (*si veda la figura a pagina 25*), il che fornisce una ulteriore prova all'ipotesi che essi una volta fossero procarioti indipendenti.

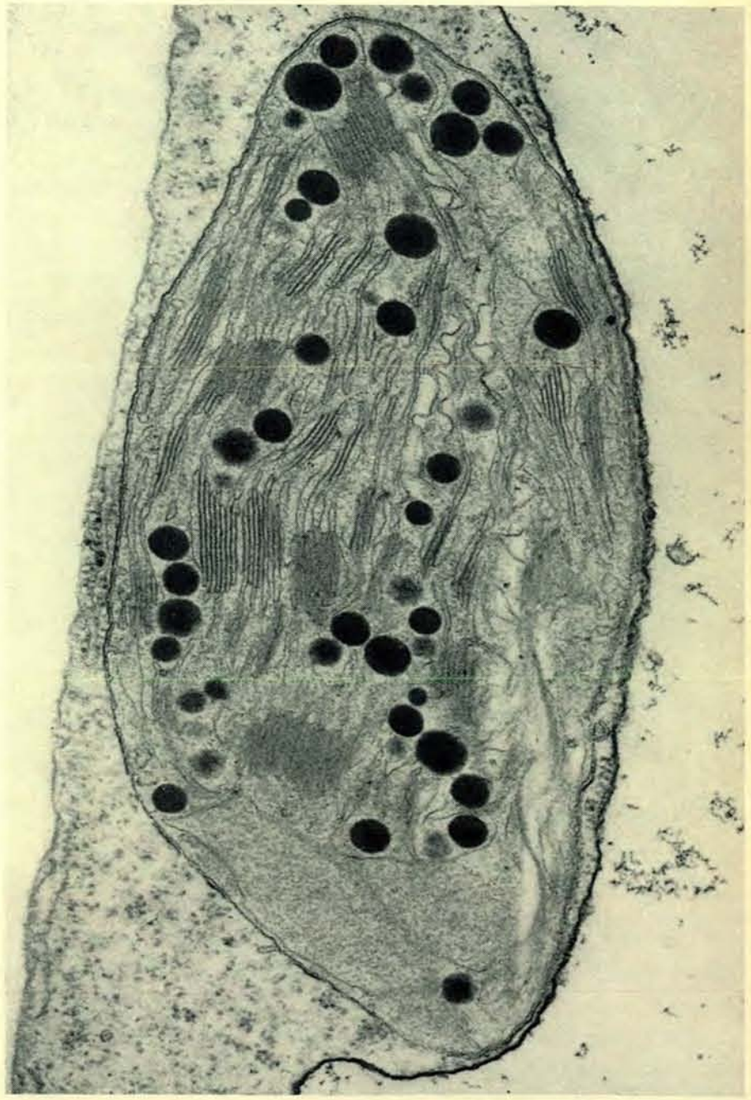
Forse la piú evidente somiglianza tra mitocondri, cloroplasti e gli attuali procarioti sta nell'apparato per la sintesi proteica. Per esempio, i loro ribosomi sono molto simili: quando vengono centrifugati essi hanno un coefficiente di sedimentazione di 70 unità svedberg (70 S). Il coefficiente di sedimentazione è una misura relativa della grandezza di un ribosoma: piú grande è il coefficiente, piú grande è la particella. I ribosomi che si trovano nel citoplasma delle cellule eucariote hanno un coefficiente di sedimentazione di 80 S. Cosí se si prepara un omogenato totale di cellule vegetali o animali e lo si centrifuga in un gradiente di soluzione di saccarosio di densità diverse, la popolazione di ribosomi si separa in due frazioni, che appaiono in grafico come un grande picco corrispondente a 80 S e uno piú piccolo equivalente a 70 S circa (*si veda la figura in basso a pagina 24*). Una eccezione a questa regola è rappresentata da certi funghi, come il lievito e la muffa rossa del pane *Neurospora*, che hanno i ribosomi mitocondriali con un coefficiente di 77 S.

Se si dissociano i ribosomi nei loro due principali componenti di RNA, la somiglianza tra i ribosomi dei procarioti e i ribosomi dei mitocondri e cloroplasti persiste. Tutti e tre contengono una specie di RNA piú pesante con un coefficiente di sedimentazione di 23 S e una specie piú leggera con un coefficiente di 16 S. Invece nei ribosomi del citoplasma la specie di RNA piú pesante ha un coefficiente da 25 a 28 S e la specie piú leggera un coefficiente di 18 S.

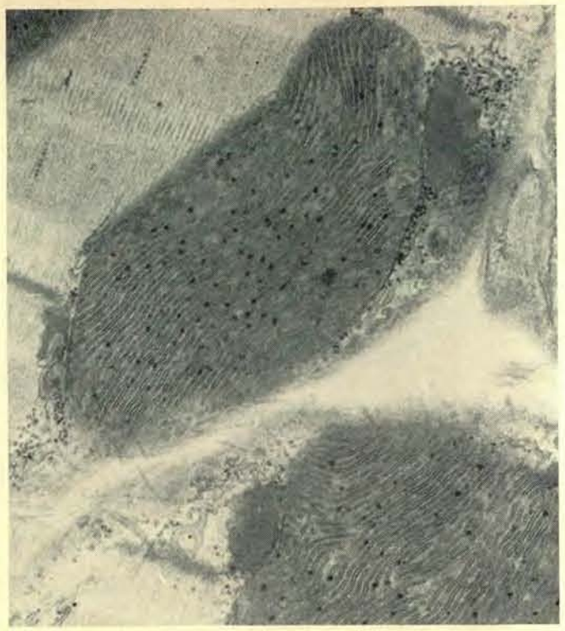
Anche i tipi di proteine contenute nei ribosomi 70 S e 80 S sembrano appartenere a due distinte famiglie, come si può dimostrare dalla loro risposta a certe sostanze chimiche. Si pensa che un certo numero di antibiotici (tra cui la streptomicina, il cloramfenicolo e la tetraciclina) uccidano i batteri reagendo con le proteine specifiche dei ribosomi, impedendo cosí la sintesi di altre proteine batteriche. Questi stessi antibiotici impediscono efficacemente ai ribosomi 70 S dei mitocondri e dei cloroplasti di sintetizzare proteine, ma non hanno effetto sui ribosomi 80 S delle cellule vegetali e animali. Al contrario, il fungicida cicloeximide inibisce la sintesi proteica dei ribosomi 80 S, ma non ha effetto sui ribosomi 70 S dei procarioti e degli organelli cellulari.

Gli antibiotici forniscono altre indicazioni sulle affinità tra l'apparato genetico dei procarioti e degli organelli. La rifampicina, un antibiotico scoperto recentemente, si lega, inattivandola, all'RNA-polimerasi DNA dipendente che si trova nei batteri, ma non si lega alla polimerasi nucleare delle cellule eucariote. Questo antibiotico inibisce anche la sintesi di RNA nei cloroplasti e mitocondri, indicando che l'RNA-polimerasi in questi organelli rassomiglia a quella dei batteri.

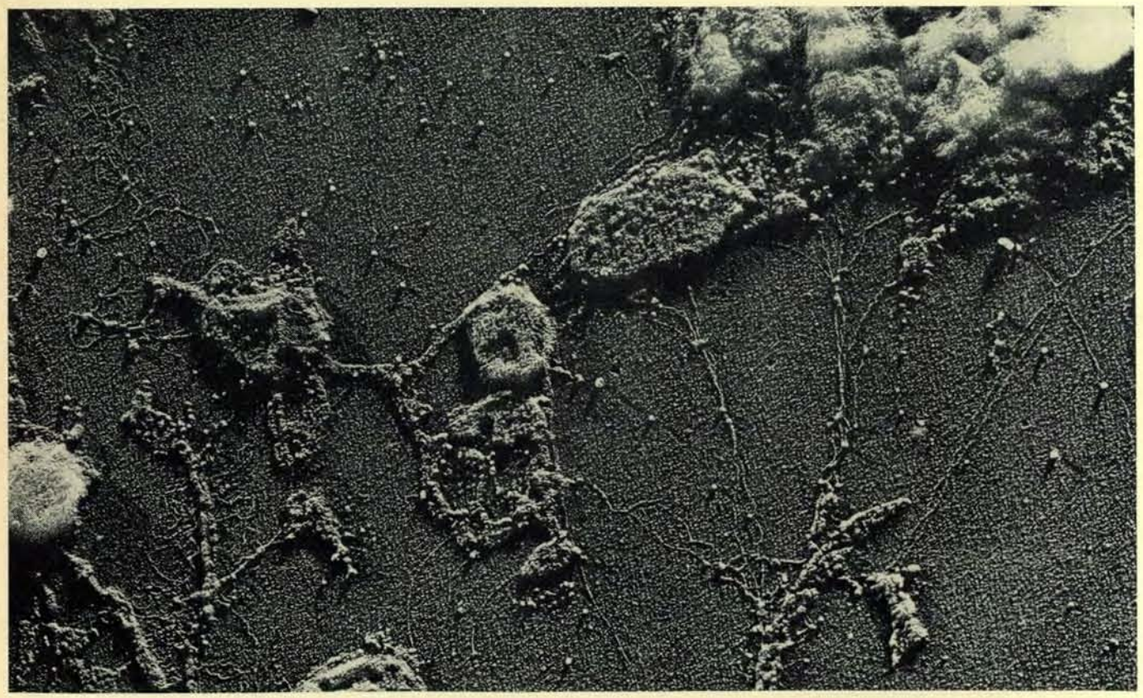
Il fatto che mitocondri e cloroplasti abbiano un sistema genetico simile a quello dei batteri e l'ipotesi che essi abbiano antenati comuni, non significa che essi siano simili in tutto. I procarioti di oggi, e probabilmente anche quelli primitivi, contengono tutta l'informazione genetica necessaria, per la loro autoriproduzione. In un ambiente adatto e con una disponibilità di carbonio, azoto e minerali, essi possono sintetizzare tutto ciò che a loro serve per crescere e dividersi. D'altra parte i mitocondri e i cloroplasti non sono capaci di sintetizzare la maggior parte delle proteine che li costituiscono e muoiono subito se isolati dal resto della cellula. Gli organelli mancano di molti enzimi necessari per la biosintesi



Il cromoplasto del pomodoro è un cloroplasto che si sta differenziando con l'accumulo di una grande quantità di pigmento rosso carotenoide. La struttura a *grana* della membrana cloroplastica va perduta durante questo processo. Questa fotografia al microscopio elettronico, ingrandita 45 000 volte, è stata eseguita da William M. Harris.



In queste due fotografie al microscopio elettronico con un ingrandimento di 35 000 si può osservare lo sviluppo dei mitocondri. La foto a sinistra mostra mitocondri immaturi di una cellula muscolare proveniente da una coda rigenerante di girino. Essi presentano poche introflessioni della membrana interna, dette creste. I mitocondri maturi, a destra, forniti di creste addossate l'una all'altra, appartengono invece a una cellula muscolare di cuore di pipistrello. Si può notare che in questo caso i filamenti sono disposti ordinatamente, mentre nella cellula del girino appaiono disorganizzati. La fotografia della cellula di girino è stata fatta da R. Warren. La fotografia della fibra miocardica è di Keith Porter dell'Università del Colorado.



Il DNA cloroplastico isolato da foglie di spinaci appare come una rete di fibre in questa fotografia di L.F. Woodcock ottenuta al microscopio elettronico con un ingrandimento di 32 000 volte. In alto a destra si vede un'ammasso di cloroplasti che, fatti scoppiare per osmosi sulla superficie dell'acqua, hanno liberato le fibre di DNA insieme a membrane granali e intergranali.

di nucleotidi, di amminoacidi e di altre molecole essenziali. Gli enzimi richiesti sono localizzati esclusivamente nel citoplasma della cellula ospite. Cosí gli organelli sono veri endosimbionti, che dipendono dal loro ospite per funzioni metaboliche indispensabili.

Che i mitocondri e i cloroplasti siano, o siano diventati, cosí dipendenti dai loro ospiti non fa poi tanta meraviglia. Sembra ragionevole che, per una migliore economia ed efficienza, le unità molecolari necessarie per varie parti di una cellula debbano venire sintetizzate nel citoplasma dove sono facilmente accessibili a tutti gli organelli. Quello che invece sorprende è trovare che la maggior parte degli enzimi e dei componenti che si trovano esclusivamente nei mitocondri e nei cloroplasti siano sintetizzati sotto la direzione di geni localizzati nel DNA del nucleo cellulare.

Gli esempi sono molti, il piú chiaro ci è dato dal citocromo *c*, componente essenziale del processo respiratorio mediante il quale i mitocondri ossidano i carboidrati e immagazzinano energia sotto forma di ATP. Nelle cellule fornite di nucleo organizzate, vegetali e animali, il citocromo *c* si trova soltanto nei mitocondri. Nel lievito sono state trovate molte mutazioni geniche che impediscono la formazione del citocromo *c*, bloccando cosí la respirazione. Questi ceppi mutanti possono crescere soltanto per fermentazione. È stato dimostrato (in gran parte dal lavoro di Fred Sherman e dei suoi colleghi della Rochester School of Medicine and Dentistry) che la maggior parte di queste mutazioni alterano un gene nucleare che contiene l'informazione per la sequenza primaria di amminoacidi nella porzione proteica della molecola del citocromo *c*. Un altro gene nucleare codifica per una specie minore della molecola, il citocromo c_1. Se un ceppo di lievito porta mutazioni in ambedue i geni non si trova nessun citocromo di tipo *c* in nessuna parte della cellula, compresi i mitocondri. Si può dunque concludere che il DNA dei mitocondri non contiene l'informazione per la sintesi di questa proteina mitocondriale. Bernhard Kadenbach dell'Università di Monaco ha dimostrato inoltre che la proteina del citocromo *c* viene sintetizzata sui ribosomi 80 S nel citoplasma e poi trasferita nel mitocondrio. Il citocromo *c* non è un caso isolato. Per esempio, i geni nucleari controllano gli enzimi solubili dei mitocondri che prendono parte alla respirazione. Altri geni nucleari sono responsabili della clorofilla, i carotenoidi, i citocromi e molti enzimi fotosintetici dei cloroplasti.

Nella maggior parte degli organismi i geni nucleari si distinguono dai geni degli organelli per il modo in cui vengono ereditati durante la riproduzione sessuale. Le cellule germinali maschili e femminili contengono una quantità uguale di DNA nucleare, cosí che la progenie erediterà un egual numero di geni nucleari da ciascun genitore. Questo tipo di eredità viene chiamata mendeliana dal nome di Gregor Mendel che la scoprí. Però la cellula germinale femminile, o cellula uovo, ha una cospicua quantità di citoplasma con mitocondri e proplastidi, mentre le cellule germinali maschili e il polline non portano quasi niente citoplasma allo zigote al momento della fertilizzazione. Ne deriva che la progenie eredita il DNA dei suoi organelli quasi interamente dal genitore femminile. Questa eredità viene chiamata non-mendeliana o materna.

Che tipo di mutazione genica non mendeliana è stata identificata che sia in grado di alterare le funzioni degli organelli? Il gruppo di mutazioni piú ampiamente studiate si trova nel lievito. Queste mutazioni, genericamente chiamate ρ^-, risultano essere piuttosto complesse. Descritte per la prima volta circa vent'anni fa, da Boris Ephrussi al Centre de Génétique Moléculair a Gif-sur-Yvette, continuano a essere studiate in molti laboratori, specialmente in quello di Piotr P. Slonimski, pure a Gif.

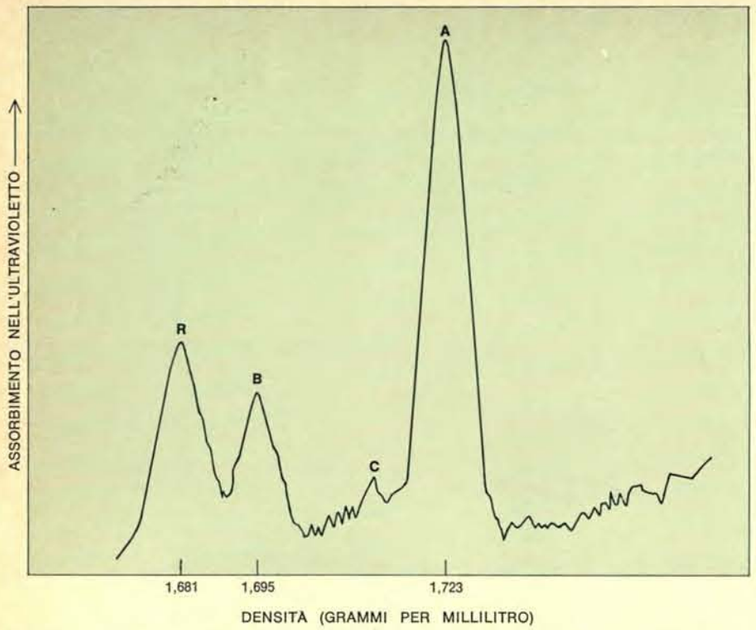
Le cellule del lievito, che sono ρ^- non possono respirare e possono soltanto crescere lentamente mediante il processo noto come glicolisi. Poiché formano piccole colonie esse vennero denominate « petites » dai ricercatori francesi che le scoprirono. I mitocondri nelle cellule ρ^- sono tipicamente rudimentali, ma i vari ceppi di cellule ρ^- differiscono molto per l'entità di tali difetti. Inoltre, in alcuni mutanti la composizione in nucleotidi del DNA mitocondriale è simile a quella dei ceppi normali; in altri mutanti il contenuto in G piú C è drasticamente alterato. Questa distruzione dell'informazione genica dei mitocondri del lievito avviene spontaneamente, ma può anche venire indotta da vari mutageni.

A differenza delle mutazioni « puntiformi » che spesso avvengono nel DNA, alterazioni causate nel DNA mitocondriale ρ^- sono difficili da analizzare. Una mutazione puntiforme, poiché colpisce un solo gene del genoma, che è un patrimonio completo di geni, causerà tipicamente l'assenza di un singolo enzima. Quando l'intero genoma mitocondriale è reso non funzionale e il mitocondrio che ne risulta manca di molti enzimi e di molte attività, è difficile capire che cosa sia successo. È possibile che la condizione ρ^- impedisca semplicemente la sintesi di una o due proteine critiche, forse importanti per l'integrità di certe strutture, il che poi porta a un certo numero di difetti secondari. O forse la condizione ρ^- implica una radicale alterazione del DNA mitocondriale sí che molte proteine non vengono sintetizzate.

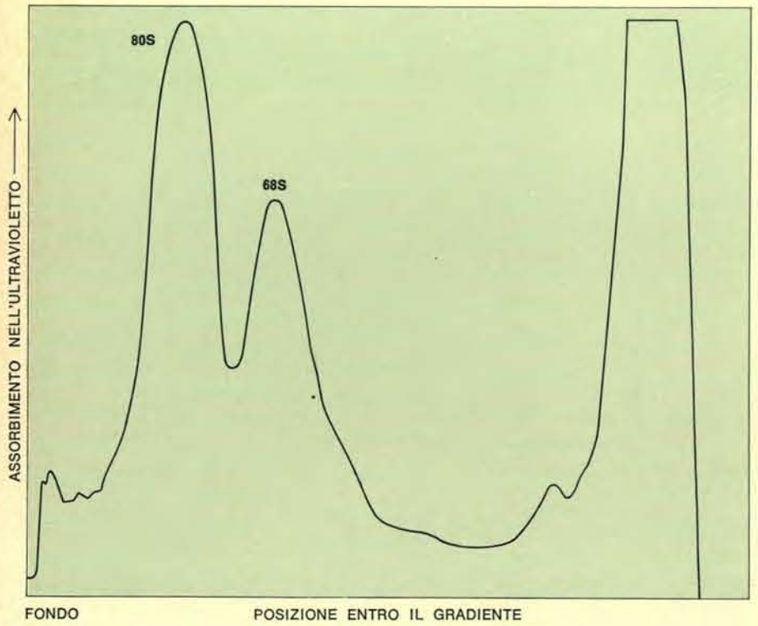
Simili problemi complicano lo studio delle mutazioni non-mendeliane che si verificano nei cloroplasti. Nella maggior parte dei casi queste mutazioni non portano a una chiara e facilmente analizzabile perdita di una singola proteina o enzima. Si osserva piuttosto un organello genericamente difettoso, comunemente mancante di clorofilla o carotenoidi, dalla struttura molto disorganizzata e privo di attività fotosintetica. In questi casi qual è l'effetto primario della mutazione e che cosa è invece dovuto a una alterazione secondaria dell'integrità dell'organello? Almeno un fatto è chiaro; la presenza di DNA normale; il DNA non è affatto un residuo superfluo di una precedente esistenza di tipo procariota.

Recentemente sono state indotte mutazioni ereditarie per via materna che sono piú accessibili a un'analisi biochimica. Queste rendono il lievito resistente agli effetti di antibiotici, come quelli sopra elencati, che inibiscono specificamente la sintesi proteica sui ribosomi 70 S. L'esistenza di queste mutazioni suggerisce che il DNA mitocondriale contenga geni che controllano la sintesi di certe proteine che costituiscono i ribosomi 70 S dei mitocondri; le proteine normali sono evidentemente inattivate dagli antibiotici, mentre le proteine mutate non lo sono. Ruth Sager del Hunter College e altri ricercatori hanno studiato mutazioni analoghe che conferiscono resistenza agli antibiotici all'alga unicellulare *Chlamydomonas reinhardi*, ma non hanno ancora stabilito se le mutazioni risiedono nel DNA dei mitocondri o dei cloroplasti dell'alga.

L'esistenza di mutazioni che conferiscono resistenza agli antibiotici suggerirebbe che una delle funzioni del DNA dell'organello sia quella di contenere l'informazione per la costruzione dell'apparato per la sintesi proteica dell'organello. Che il DNA dell'organello sia infatti responsabile della sintesi dell'RNA ribosomale dell'organello stesso è stato dimostrato in vari organismi. Una tecnica molto usata è quella di isolare l'RNA ribosomale degli orga-



I tre tipi di DNA estratti dall'alga unicellulare *C. reinhardi*, vengono centrifugati in un gradiente di cloruro di cesio, in modo da separarli secondo la densità. In grafico appaiono come tre picchi oltre al picco *R* che serve da controllo ed è ottenuto da DNA sintetico. Il DNA piú abbondante nella cellula (*A*), deriva presumibilmente dal nucleo. Il picco di grandezza intermedia (*B*) deriva probabilmente dai cloroplasti. Il picco (*C*) si pensa che rappresenti il DNA mitocondriale, ma non è ancora stato dimostrato. I dati sperimentali riportati sono stati ottenuti da Kwen-sheng Chiang.

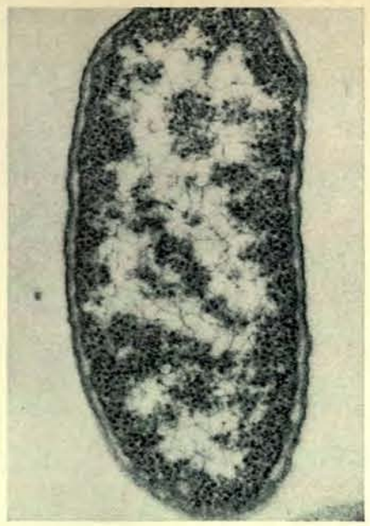


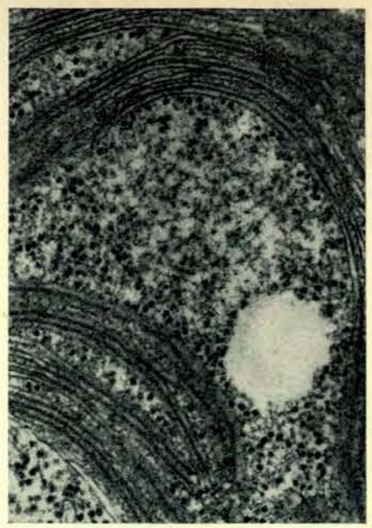
I ribosomi della *C. reinhardi*, centrifugati in un gradiente di saccarosio, danno luogo a due picchi. Il maggiore è costituito di ribosomi citoplasmatici con un coefficiente di sedimentazione di 80 S. Il picco minore è costituito di ribosomi piú leggeri (68 S), probabilmente derivati dai cloroplasti. L'ampia banda di assorbimento all'estrema destra è data dalla clorofilla. La curva è stata ottenuta da S.J. Surzychi dell'Università di Iowa.

nelli cresciuti in una coltura radioattiva e incubarli con DNA non radioattivo per vedere se si forma tra loro un complesso stabile, ovvero un ibrido. L'avvenuta ibridazione indica che il DNA contiene sequenze di nucleotidi complementari alle sequenze dell'RNA e quindi l'RNA è presumibilmente sintetizzato sullo stampo del DNA. Questi esperimenti hanno dimostrato una complementarietà tra DNA mitocondriale e cloroplastico e i loro corrispondenti RNA ribosomali. Un altro modo per studiare lo stesso problema, seguito da Stefan J. Surzychi dell'Università di Iowa, fa uso della rifampicina l'antibiotico che inattiva l'RNA polimerasi DNA dipendente che si trova nei batteri e nelle alghe azzurre. In presenza di rifampicina la *C. reinhardi* non è capace di sintetizzare le specie 16 S e 24 S dell'RNA ribosomale dei cloroplasti, indicando che questi RNA sono sintetizzati su uno stampo di DNA cloroplastico.

Che cosa si può dire delle altre parti dell'apparato per la sintesi proteica degli organelli? Sia i mitocondri che i cloroplasti contengono almeno certe specie di t-RNA con proprietà differenti da quelle dei loro corrispondenti citoplasmatici. Sono anch'essi trascritti da geni localizzati nell'organello? Forse, ma non necessariamente. Fino a che non sarà stato dimostrato diversamente, mediante esperimenti di ibridazione, o in qualche altro modo, l'esistenza di un particolare tipo di RNA in un organello non significa che esso debba essere stato trascritto dal DNA dell'organello stesso. Per esempio il t-RNA del citoplasma potrebbe migrare nel cloroplasto o mitocondrio e venire ivi modificato in qualche modo critico sí che le sue proprietà biochimiche si adattino al sistema di sintesi proteica dell'organello.

Noi abbiamo constatato che certi geni nucleari codificano per le proteine che si troveranno poi localizzate esclusivamente negli organelli e che, nel caso ben documentato del citocromo *c* del lievito, il componente proteico del citocromo è completamente sintetizzato sui ribosomi 80 S presenti nel citoplasma e poi trasportato dentro il mitocondrio. Però, non c'è motivo di credere che questa via debba essere seguita dall'RNA messaggero derivante da tutti i geni nucleari che codificano le proteine degli organelli. Poiché i ribosomi sono chiaramente capaci di tradurre qualsiasi RNA messaggero venga a essi fornito, è possibile, sebbene ancora non sia stato dimostrato, che l'RNA messaggero del nucleo venga





Batteri, cloroplasti e mitocondri presentano caratteristiche comuni che fanno ritenere che questi moderni organelli e i batteri possano avere antenati comuni. Il batterio cilindrico (*a sinistra*) è circondato da una parete e da una membrana cellulari, ma non contiene organelli attaccati alla membrana. Contiene però ribosomi fortemente addensati e nucleoidi, in cui si possono vedere i filamenti di DNA. Anche il cloroplasto di *C. reinhardi* (*in mezzo*) contiene ribosomi fortemente addensati e nucleoidi con filamenti di DNA. A destra si vedono due mitocondri di *C. reinhardi* immersi nel citoplasma. Essi contengono pochi ribosomi e il DNA mitocondriale non è visibile. Le tre fotografie, tutte ingrandite 50 000 volte, sono di Ursula W. Goodenoughi.

trasportato nell'organello e tradotto dai ribosomi 70 S dell'organello stesso. Al contrario, l'RNA messaggero dell'organello potrebbe venire tradotto sia nei cloroplasti che nel citoplasma.

Queste considerazioni sono importanti per dare la corretta interpretazione a certi tipi di esperimenti. Per esempio, è stato dimostrato che organelli isolati incorporano amminoacidi in proteine relativamente insolubili che si pensa facciano parte delle membrane degli organelli. Questi esperimenti indicano che gli organelli isolati contengono RNA messaggero che porta l'informazione per le proteine della membrana, ma essi non possono da soli dirci dove sono localizzati i geni per queste proteine. Similmente, è stato dimostrato che la sintesi di certe proteine specifiche degli organelli viene inibita da antibiotici specifici per i ribosomi 70 S, mentre la sintesi di altre proteine non viene inibita.

Dopo queste considerazioni, possiamo riassumere quello che correntemente e ipoteticamente si pensa sulla capacità genetica degli organelli cellulari. Probabilmente il DNA mitocondriale contiene l'informazione per l'RNA ribosomale dei mitocondri, per almeno alcune proteine dei ribosomi mitocondriali e per certe proteine necessarie per l'integrità strutturale e funzionale delle membrane mitocondriali. I ribosomi mitocondriali sono impegnati nella sintesi di alcune proteine, probabilmente, ma non è stato ancora dimostrato, quelle codificate dal DNA mitocondriale. La maggior parte del complesso enzimatico dei mitocondri è chiaramente codificato dal DNA nucleare e sintetizzato nel citoplasma. Quindi il genoma mitocondriale non sembra contenere molti geni, cosa che non fa meraviglia considerando le sue dimensioni. Una tipica molecola di DNA (cromosoma) dei mitocondri di cellule animali ha un peso molecolare di circa 11 milioni, minore di quello dei piú piccoli virus. Ciò significa DNA sufficiente per costituire forse da 10 a 25 geni di media lunghezza.

Il peso molecolare medio del DNA cloroplastico è piú difficilmente determinabile, ma sembra che sia circa 300 volte piú grande di quello del DNA mitocondriale e quindi dovrebbe essere in grado di portare un'informazione molto maggiore. Questa informazione probabilmente include parecchi geni per l'RNA ribosomale dei cloroplasti, al meno alcuni per le proteine ribosomali dei cloroplasti, parecchi geni per la corretta organizzazione delle membrane cloroplastiche e uno o piú geni per la sintesi di un complesso fotosintetico funzionale. Probabilmente i ribosomi cloroplastici sono impegnati nella sintesi della maggior parte di queste proteine. Nel *C. reinhardi* i ribosomi dei cloroplasti partecipano alla sintesi della ribosio-1,5-fosfatocarbossilasi, enzima impegnato nella fissazione fotosintetica dell'anidride carbonica. È noto però che il DNA dei cloroplasti non contiene l'informazione per la sintesi di questo enzima.

Abbiamo studiato un ceppo mutante di *C. reinhardi* chiamato *ac-20* che può fabbricare solo pochi ribosomi cloroplastici in certe condizioni di crescita. Le lesioni fotosintetiche e strutturali di queste cellule sono molto simili a quelle di cellule la cui sintesi proteica viene bloccata dal cloramfenicolo, come ci si potrebbe aspettare. È significativo il fatto che il gene *ac-20* venga ereditato secondo lo schema mendeliano suggerendo che il nucleo può esercitare un controllo sulla sintesi dei ribosomi degli organelli. Il controllo nucleare sulla sintesi del DNA degli organelli è pure stato riscontrato. Se si dimostrerà che il nucleo ha acquistato un controllo sostanziale sulla produzione dei sistemi genetici dell'organello in tutti i casi, diventerà difficile capire perché questi sistemi genetici continuino a essere prodotti, per quale ragione i mitocondri e i cloroplasti, tralasciando la loro origine, non si siano evoluti in semplici organelli contenenti enzimi la cui perpetuazione è interamente controllata dal nucleo. Si può pensare che questo non sia avvenuto perché il DNA degli organelli contiene geni essenziali le cui funzioni, per qualsivoglia ragione, non possono essere esplicate da geni nucleari e che almeno alcuni di questi geni debbano essere trascritti e tradotti da un sistema primitivo di sintesi proteica, simile a quello dei batteri.

Woodhenges

Il celebre monumento di Stonehenge è solo uno degli 80 complessi del periodo neolitico noti in Gran Bretagna. Recenti scavi hanno rivelato che essi racchiudevano all'origine strutture di legno e non di pietra

di Geoffrey Wainwright

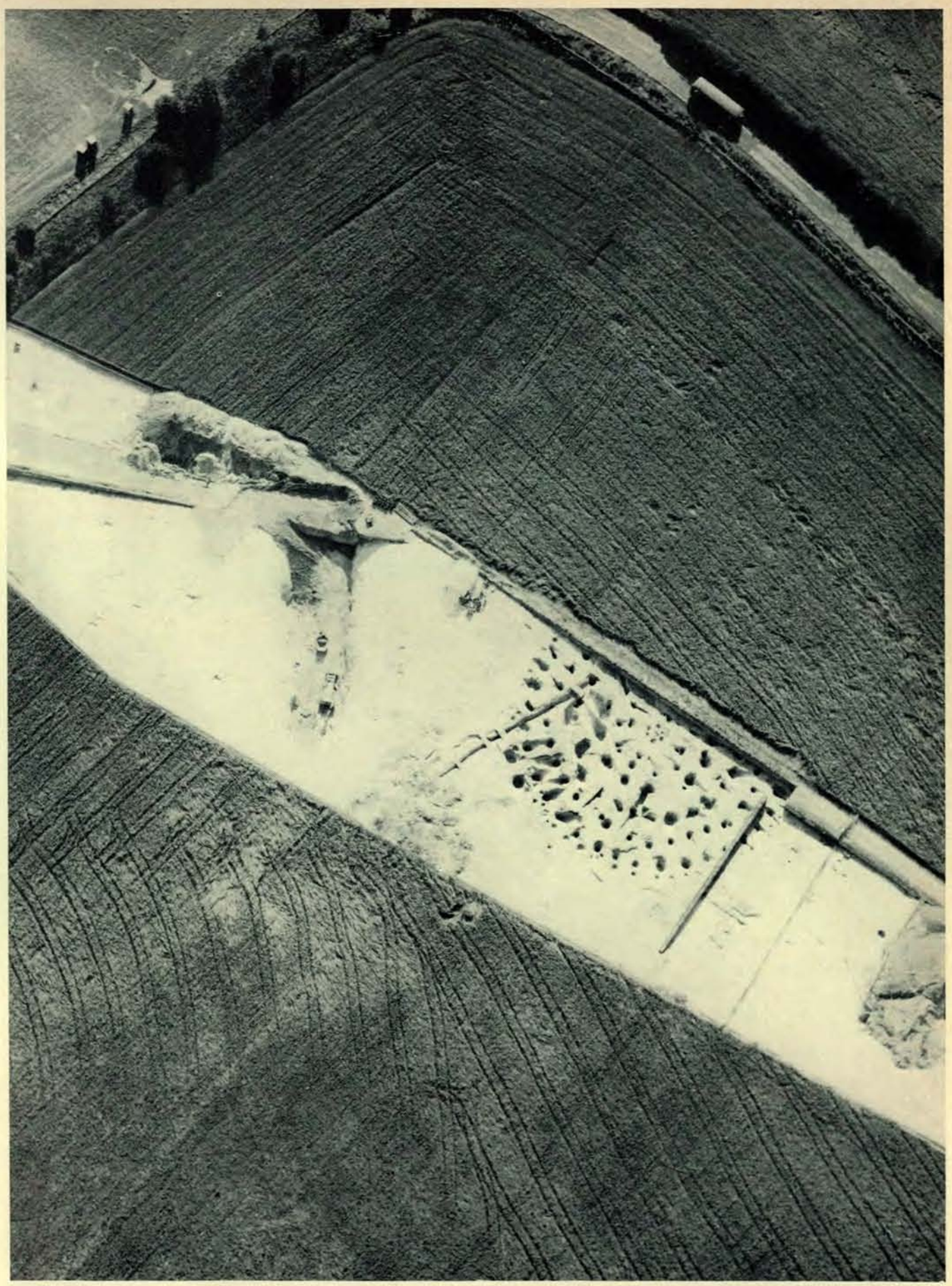
Il complesso circolare in pietre massicce nella piana di Salisbury, conosciuto con il nome di Stonehenge, è cosí noto presso il pubblico da deformare l'idea che la maggior parte della gente si è fatta sugli altri monumenti dello stesso tipo, costruiti nel periodo neolitico in Gran Bretagna. Tutti questi monumenti consistono, essenzialmente, in un terrapieno circolare che racchiude un fossato. In alcuni casi, come a Stonehenge, il terrapieno racchiude un gruppo di monoliti. Recenti ricerche archeologiche, condotte in due fra i piú grandi monumenti esistenti in Gran Bretagna, hanno rivelato che i vasti terrapieni circondavano delle strutture di legno e non di pietra. Questa scoperta aumenta da due a quattro il numero noto di questo tipo di monumenti dalle strutture lignee, e a otto il numero conosciuto di strutture in legno all'interno di questi complessi. Il fattore piú importante di questa scoperta è che, per mezzo di essa, si può in parte capire la funzione per la quale erano stati costruiti questi vasti complessi del secondo millennio a.C. Per un periodo che va dalla fine del terzo millennio alla metà del secondo millennio a.C., gli abitanti neolitici della Gran Bretagna costruirono almeno 80 di questi monumenti. In termini di fatica umana lo sforzo fu veramente gigantesco. Per esempio, la costruzione di uno dei quattro complessi piú grandi, la cerchia di Avebury nel Wiltshire, richiese lo scavo di un fosso circolare profondo all'incirca 10 metri, largo un po' piú del doppio, e lungo piú di un chilometro. La terra rimossa serví per innalzare una banchina, al di fuori del fossato, alta quasi 6 metri e larga 25. Si ritiene che l'impresa abbia richiesto piú di un milione e mezzo di ore lavorative.

Si sono fatte molte ipotesi sul significato di questi monumenti. Il prezzo di energia umana complessivamente impiegato, suggerisce che la società di allora fosse sufficientemente solida per permettersi di trasferire la mano d'opera dal compito principale, quale era quello della produzione del cibo, a cosí impegnative opere di costruzione. Ciò che sappiamo sulla vita familiare nel periodo neolitico in Gran Bretagna, non può condurci a pensare che esistesse una società cosí ricca da permettere la costruzione di simili monumenti. Gli scavi condotti in queste due nuove costruzioni lignee, hanno avvalorato le nostre ipotesi su questo, in apparenza paradossale, enigma. Prima di dare un resoconto delle nuove scoperte da noi fatte sarà però utile collocare questi monumenti nella loro esatta prospettiva.

I quattro monumenti piú importanti della Gran Bretagna neolitica sono situati tutti in una zona dell'Inghilterra meridionale, nota per il gran numero di altri monumenti di ogni dimensione ritrovati. Uno dei quattro, chiamato Mount Pleasant, giace vicino alla costa del Dorset, 96 chilometri a sud-ovest di Stonehenge. Gli altri tre, da nord a sud[redacted]o: Avebury, Marden e Durrington Walls nel Wiltshire. Sono tutti sulle sponde del fiume Avon e distano fra loro non piú di una cinquantina di chilometri. Alcuni lavori stradali in quella zona, condussero il Dipartimento alle antichità, divisione del Ministero dei lavori pubblici, a intraprendere uno studio archeologico a Durrington Walls nel 1966-1967. Le scoperte fatte condussero poi a intraprendere degli scavi a Marden nel 1969.

Il risultato di piú di due secoli di studi da parte di appassionati e di professionisti, è che solo un quarto dei molti monumenti neolitici scavati in Gran Bretagna, hanno prodotto dei reperti che possono venire datati. Appare però evidente, che la tradizione di costruire terrapieni circolari iniziò nelle Isole Britanniche, verso il terzo millennio a.C. All'inizio, i fossati intorno alle cerchia centrali non erano continui; questi circoli interrotti vennero definiti con il nome di « zone rialzate ». L'evidenza archeologica indica che questi primi terrapieni non erano, come invece era stato suggerito all'inizio, dei luoghi di accampamento o dei recinti per il bestiame. In molti di questi la quantità di reperti che indicano animali macellati, strumenti per macinare cereali e diversi tipi di terraglia, fa pensare, piuttosto, che gente proveniente da varie parti, si radunasse in queste zone rialzate di tanto in tanto e in gran numero. Anche oggi non si può visitare uno di questi complessi neolitici, senza pensare che fosse stato creato per dei raduni pubblici. Il terrapieno o banchina, piú alto dell'area che racchiude e che sembra ancora piú alto a causa del fossato profondo all'interno, è una tribuna ideale per poter seguire le attività all'interno della cerchia. Niente di simile accoglie chi visita Durrington Walls, sebbene le sue dimensioni siano abbastanza impressionanti. La sua banchina esterna, in origine larga circa 28 metri, ha un diametro approssimativo di oltre mezzo chilometro e aveva un'altezza di 2,70 metri dal livello del suolo. All'interno della banchina si estende una superficie piana, larga da 6 a 43 metri, sino alla sponda del fossato in origine largo 15 metri e profondo quasi 6. Ho calcolato che la costruzione del fossato e della banchina di Durrington Walls abbia richiesto circa 900 000 ore di lavoro umano.

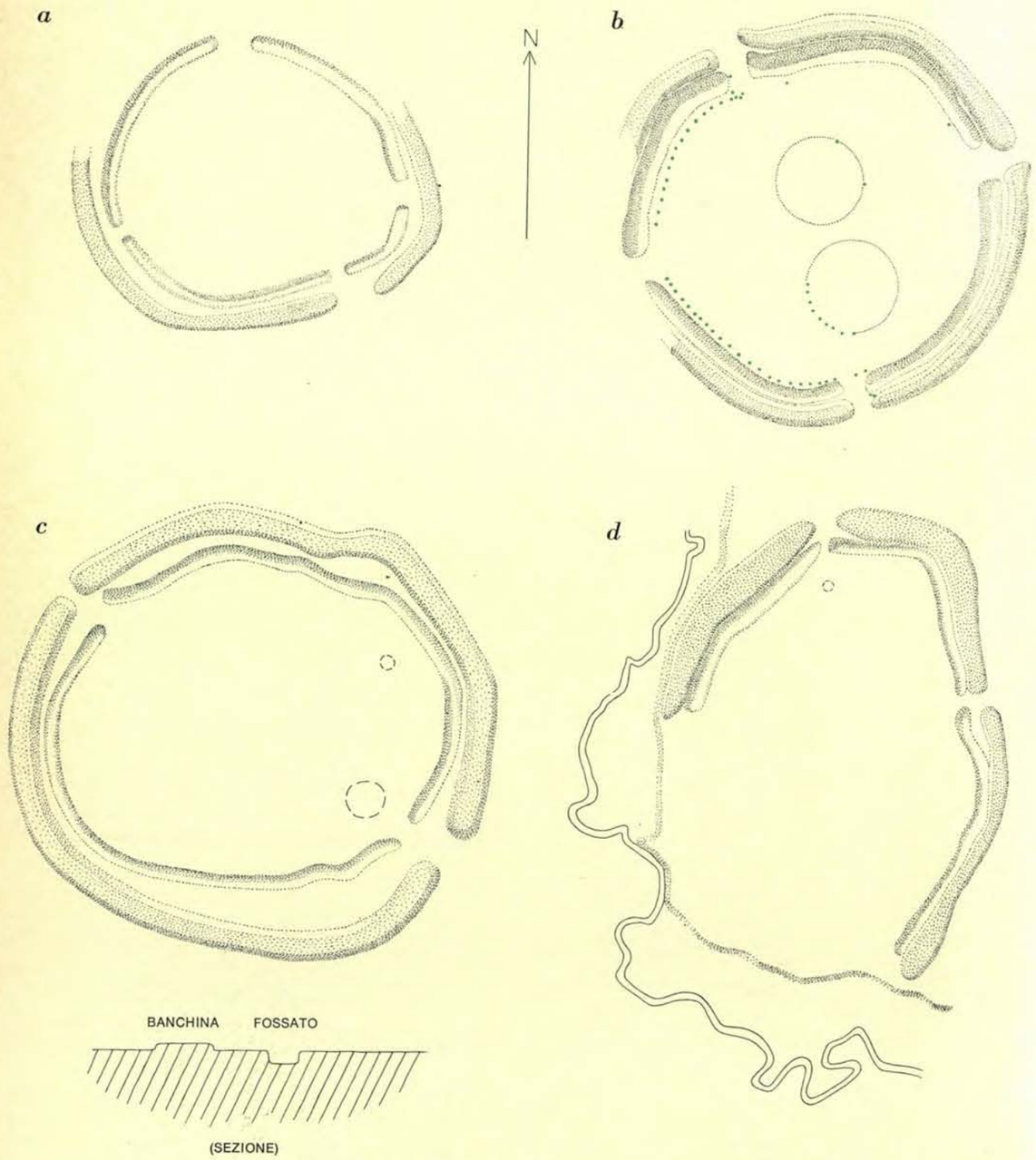
Approssimativamente 12 ettari di una vallata arida che scende verso il fiume Avon, sono circondati dal terrapieno. Purtroppo, si può ora intravedere ben poco dell'antico splendore del monumento; secoli di aratura hanno del tutto cancellato il terrapieno, il fossato e le tracce dei due « marciapiedi » che servivano d'accesso alla cerchia sia da nord-ovest che da sud-est. Ciononostante, non si può fare a meno d'immaginarsi la vista della vallata



Lo scavo che si vede in questa fotografia aerea, attraversa il fossato che circondava Durrington Walls. All'incirca 27 metri all'interno del recinto (*al centro a destra*), sono state riportate alla luce tracce di una struttura lignea antecedente.

come doveva essere dalla sommità della banchina e vien fatto di domandarsi se quel luogo non fosse stato scelto proprio per quella ragione.

Nel 1966, venne dato il permesso di costruire una strada che attraversasse la parte est della cerchia di Durrington Walls a patto che venisse prima compiuta un'investigazione archeologica sul posto scelto. Gli scavi, iniziati nel 1966 e completati nel 1967, prevedevano lo scavo di una striscia che seguiva il tracciato della futura strada e comprendeva una parte del fossato e del marciapiede di sud-ovest. Nel punto d'incontro tra il fossato e il marciapiede, riportammo alla luce una gran quantità di terraglie rotte, di ossa di animali, di pietre focaie e di utensili appuntiti fatti di corno di cervo. Evidentemente tutti questi oggetti erano stati gettati nel fossato da chi era passato dal marciapiede per entrare o



Quattro dei maggiori complessi neolitici della Gran Bretagna sono riprodotti nel disegno qui sopra. Essi sono: Mount Pleasant (*a*), Avebury (*b*), Durrington Walls (*c*) e Marden (*d*). I disegni mostrano le dimensioni attuali o ricostruite della banchina e del fossato di ogni complesso. I contorni delle strutture di legno, che sono state riportate alla luce a Durrington Walls e a Marden, sono qui riprodotte in nero; l'insieme di pietre che è stato riportato alla luce ad Avebury è indicato in colore.

uscire dalla cerchia.

All'incirca 27 metri all'interno di questa, scoprimmo, nel corso degli scavi, delle buche per pilastri che formavano una complessa struttura circolare. Esse giacevano, protette da una coltre di terra arata e spessa circa un metro e mezzo, in una zona piana del terreno in fondo alla vallata. Procedendo con gli scavi, divenne evidente il fatto che non una, ma due strutture erano state costruite nella zona che chiamammo la cerchia meridionale. L'evidenza della prima struttura ci venne data da una serie di quattro cerchi quasi concentrici di buche che dovevano avere sostenuto delle esili colonne di legno; il cerchio piú esterno aveva un diametro di circa 30 metri e quello piú interno di un paio di metri. Questa prima struttura era stata sostituita da una piú vasta, formata da 6 cerchi, quasi concentrici, di pali. Molte buche della seconda struttura incrociavano o addirittura avevano cancellato le impronte delle buche della precedente struttura.

Il cerchio esterno di questa seconda, aveva un diametro di 39 metri. Partendo dal cerchio piú esterno, da noi contrassegnato come cerchio *A*, e arrivando a quello piú interno, cerchio *E*, le buche aumentavano di misura. Le buche di quest'ultimo cerchio avevano in media un diametro un po' inferiore a 2 metri ed erano profonde poco piú di 2 metri; era evidente che esse avevano sostenuto dei pali di circa 60 cm di diametro. La struttura aveva una sola entrata da sud-ovest, davanti al marciapiede. L'entrata era indicata da due buche piú larghe di quelle del cerchio *A*. Una buca aveva un diametro di 1,80 metri, e l'altra di 1,50; esse avevano rispettivamente sostenuto dei pali del diametro di 100 e di 90 cm.

Al di fuori dell'entrata, si ergeva una piattaforma costruita con blocchi di gesso e breccia di selce. Su questa erano stati fatti bruciare dei fuochi e il terreno intorno conteneva frammenti di terraglia, di pietre focaie, pezzetti di corno e ossa di animali. A nord della struttura era stata ricavata, nello strato di roccia gessosa, una cavità in parte circondata da uno steccato di paletti. Questa cavità era riempita di terra nera cinerina che conteneva anch'essa frammenti di terraglia, di pietre focaie e di ossa di animali.

Continuando con gli scavi, trovammo i resti di una seconda struttura circolare, circa 120 metri a nord della prima. Chiamammo questa la cerchia settentrionale; essa era molto piú semplice e piccola della sua vicina. Quattro larghe buche tracciavano il contorno di un cerchio interno del diametro di 7,50 metri. Concentrico a questo cerchio interno, trovammo un cerchio di buche piú piccole, del diametro di circa 14,50 metri. L'unica entrata guardava quasi esattamente a sud e veniva raggiunta attraverso una via tracciata irregolarmente da pertiche di legno e nascosta alla vista da pali disposti ai due lati della strada, in fila e molto vicini l'uno all'altro, perpendicolari alla via d'accesso e a circa 6 metri di distanza da questa.

Il basso fossato di Marden visto durante una fase degli scavi; la fotografia è presa dal recinto. La superfice piana a sinistra, un po' piú in basso di quella attuale, è il marciapiede di accesso a nord. I sassi in alto a destra, sono ciò che rimane della banchina che una volta formava un semiperimetro intorno al recinto di circa 15 ettari.

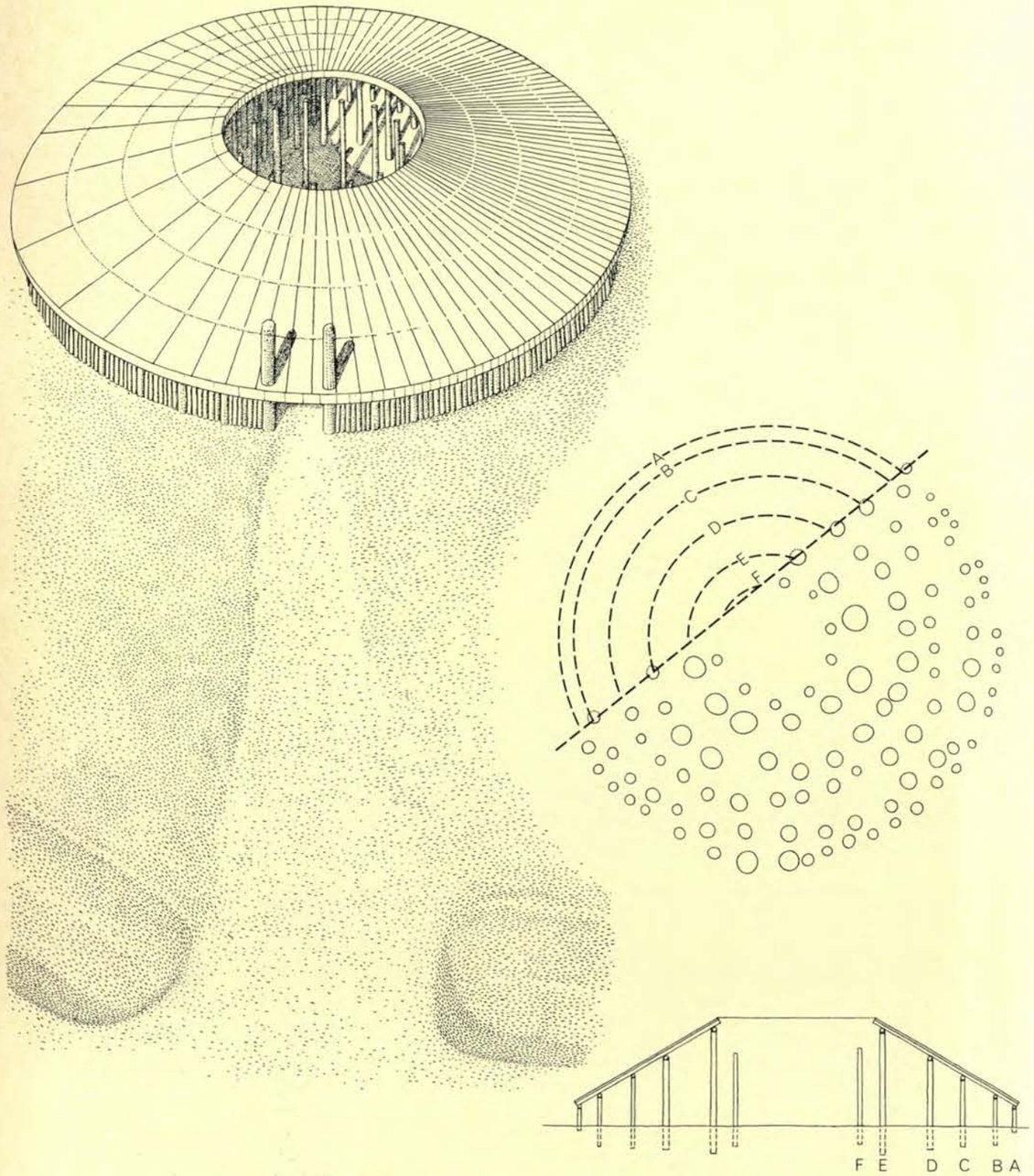
Vi sono molti dati che permettono di dimostrare che Durrington Walls venne frequentato per piú di 500 anni. Analizzando il carbonio-14 contenuto in campioni di carbone trovati nel fossato, si poté dimostrare che questo era stato affondato nello strato di roccia gessosa, all'incirca 2000 anni a.C. Una delle buche della cerchia meridionale conteneva frammenti di carbone, di ossa di animali e di corno; le analisi del carbonio-14 su questi resti, indicarono che la piú recente delle strutture fu eretta fra il 2000 e il 1900 a.C. Frammenti di carbone, presi in due zone del fossato dove vi era evidenza che erano stati accesi dei fuochi, provarono che questi fuochi erano stati accesi a Durrington Walls fino al 1600 a.C.

La fondamentale domanda da porsi sulle strutture di Durrington Walls è se i pali di legno verticali fossero parte di un qualche ornamento all'aperto, oppure se fossero invece il sostegno di tetti. Il mio collega C.R. Musson ha condotto delle ricerche su questo problema. La sola forma di costruzione che egli pensa si adatti alla disposizione delle buche della cerchia meridionale di data piú recente, è un recinto a forma anulare, coperto da un tetto di paglia, inclinato verso il basso e in fuori, il cui colmo fosse all'altezza del cerchio *E*. La costruzione dovrebbe aver racchiuso un cortile centrale aperto e il tetto in pendio avrebbe dovuto finire con un muro esterno, rappresentato dal cerchio *A* (*si veda la figura nella pagina seguente*). Supponendo che la pendenza del tetto sia di 25 gradi e l'altezza esterna di circa 2,70 metri, il tetto sarebbe stato alto poco piú di 9,20 metri in corrispondenza al cerchio *E*. I pali che formavano il cerchio *F*, probabilmente rappresentavano un circolo di pali verticali, posti nella corte non con funzione di sostegno, ma come ornamento centrale della costruzione. Musson considera le buche della cerchia settentrionale come i resti della struttura di una costruzione a tetto, meno importante della prima, con un tetto di paglia esterno circolare a forma di cono, e al centro, un « lucernario » sorretto dai quattro pali grossi di cui restano le tracce delle buche.

Da tutti gli scavi nelle varie zone di Durrington Walls, abbiamo ricavato una gran quantità di materiale, in rap-

porto a quanto poco è stato ricavato dagli scavi negli altri monumenti del genere. La terraglia appartiene a un tardo esempio di ceramica del periodo neolitico, conosciuta con il nome di « Grooved Ware ». Nel riunire con attenzione i vari pezzi di coccio, ci si accorse che, talvolta, frammenti dello stesso vaso erano depositati accuratamente in luoghi diversi. Per esempio, dei frammenti dello stesso vaso erano stati messi vicino ai vari pali della cerchia meridionale. In un caso, il frammento di un recipiente era stato appoggiato contro un palo all'interno della struttura, e un altro, invece, in un cumulo insieme ad altri resti, al di fuori della stessa. Ritorneremo sull'argomento per cercare di capire il significato di queste azioni.

Le ricerche nel fossato, nelle buche, sulla piattaforma e nel cumulo di rovine, fruttarono un totale di circa 12 000 pietre focaie usate e di 360 attrezzi; tra questi vi erano 200 raschietti e 60 punte di frecce, quasi tutte del tipo trasversale (*si veda la figura qui accanto*). I 30 strumenti di osso trovati sul luogo comprendevano dei punteruoli e delle spille. Fra i resti di animali vennero identificate in maggioranza ossa di maiale. I resti completi o i frammenti di 440 strumenti appuntiti fatti di corno di cervo e usati, in quel periodo, principalmente per scavare, ci danno una qualche indicazione sullo sforzo compiuto nel costruire le cerchia e per innalzare le costruzioni interne.

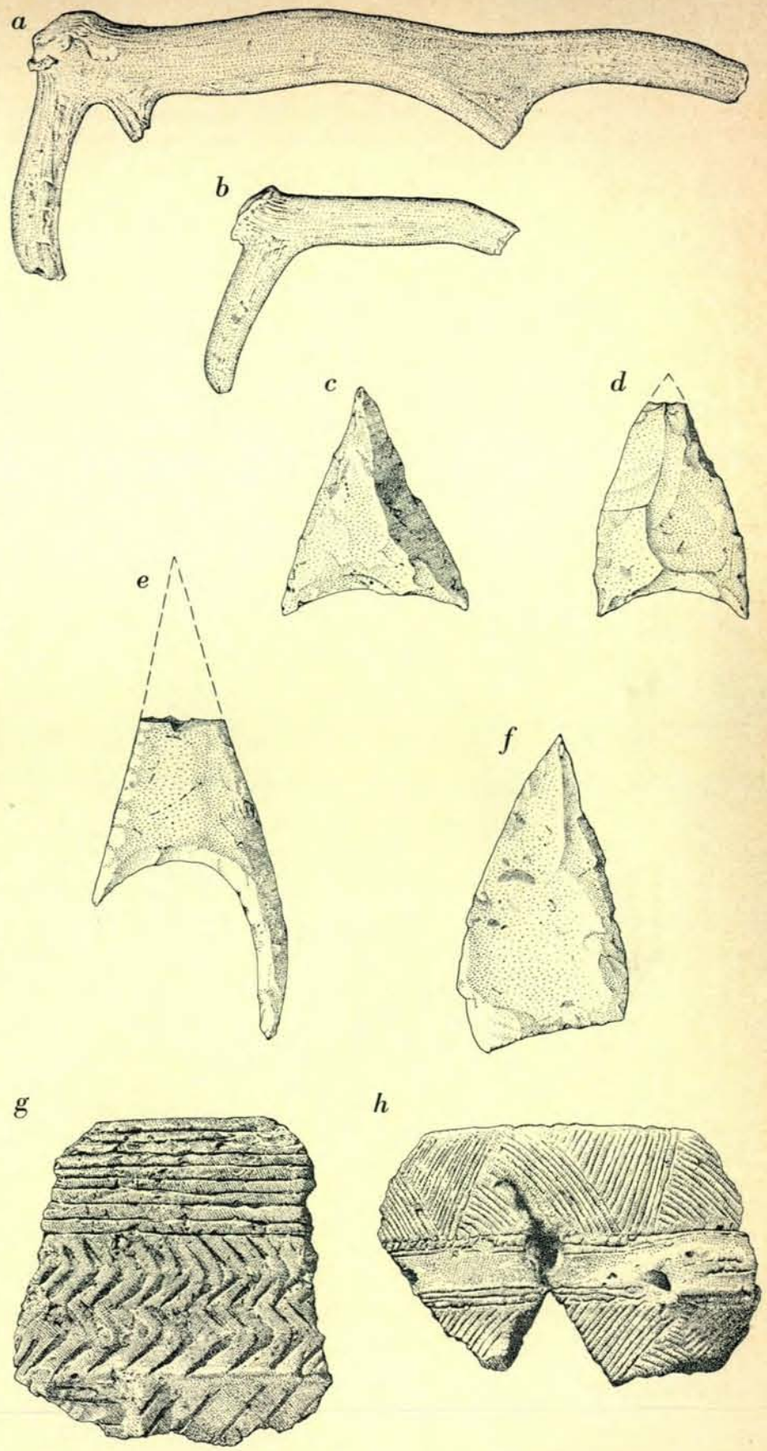


Il maggiore edificio di Durrington Walls è ricostruito in alto a sinistra. La pianta delle buche (*a destra al centro*) mostra che gli scavi non hanno riportato alla luce l'intera struttura. Il disegno della sezione (*in basso a destra*), mostra che la lunghezza dei pali verticali aumentava verso l'interno. Questa è la piú recente delle due costruzioni della cerchia meridionale.

Nelle operazioni di scavo compiute su 29 monumenti in Inghilterra, Galles e Irlanda, solo in 9 casi vi è evidenza di attività umana all'interno delle cerchia. Fu quindi con un certo pessimismo che l'anno scorso iniziammo gli scavi a Marden, il piú vasto dei quattro grandi monumenti neolitici. Situato nella valle di Pewsey, in una pianura bassa vicina alle sorgenti dell'Avon, esso dista una quindicina di chilometri da Durrington Walls, 13 chilometri da Avebury e comprende un'area di 14 ettari. Secoli di aratura hanno quasi completamente cancellato ogni traccia del terrapieno e del fossato che, in ogni caso, non formano un cerchio; tutta la delimitazione della cerchia a sud e metà del loro quadrante ovest, è invece segnata dal corso dell'Avon (*si veda la figura a pag. 28*). Marden è unico rispetto agli altri monumenti neolitici, non solo per questa caratteristica, ma anche perché le sue due entrate, invece di essere diametralmente opposte, sono ad angolo retto, una a nord e l'altra a est.

Trovandoci davanti a 14 ettari di superficie e avendo un periodo di tempo a disposizione limitato, non sapevamo da dove cominciare a lavorare. Data la natura del sottosuolo e a causa delle innumerevoli tane scavate dalle talpe, non potemmo fare uso di nessuno degli apparecchi per saggiare il terreno, alla ricerca di tracce di eventuali strutture lignee. Infine venne deciso di cominciare a scavare dall'entrata nord e di ripulire anche 3 metri quadri all'interno della cerchia, approssimativamente a 30 metri dall'entrata. Prendemmo questa decisione in seguito al successo ottenuto con analogo metodo a Durlington Walls, la cui cerchia sud venne infatti scoperta all'incirca 30 metri all'interno dell'entrata di sud-est, sperando che fra i due monumenti vi fossero delle analogie.

Scoprimmo che il fossato di Marden era stato largo piú di 15 metri, ma profondo solo 2 metri circa. Le dimensioni originali del terrapieno che l'ave-



Fra gli oggetti portati alla luce a Durrington Walls vi erano 440 punteruoli intatti o in frammenti, ricavati da pezzi di corno; nella figura ne sono raffigurati due, le cui dimensioni sono un quarto delle reali (*a*, *b*). Fra gli oggetti di selce, trovati sul luogo, 60 erano punte di frecce; quattro di esse sono qui riprodotte, in scala 2:3 rispetto alla dimensione reale (*c*, *d*, *e*, *f*). Quasi tutti i frammenti di terraglie appartengono al tipo Grooved Ware, comune in Gran Bretagna durante la tarda epoca neolitica; due esempi sono qui riprodotti a un quarto della loro dimensione reale (*g*, *h*).

va circondato sono incerte. Come a Durrington Walls, la parte del fossato adiacente al marciapiede che portava all'entrata, quando venne da noi scavata, ci procurò quantità di vasi, pietre focaie, strumenti appuntiti di corno e ossa di animali, lí gettati dalla gente che entrava o usciva dalla cerchia (*si veda la figura qui sotto*). Quando iniziammo i lavori nelle due zone prescelte all'interno della cerchia, trovammo un'analogia pure qui fra Marden e Durrington Walls. Durante gli scavi scoprimmo un cerchio di buche all'incirca di 9,70 metri di diametro e altre tre buche poste in fila piú o meno al centro del cerchio. Il terreno sopra di esse era stato cosí smosso da secoli di aratura che oramai era rimasto intatto solo il fondo di queste.

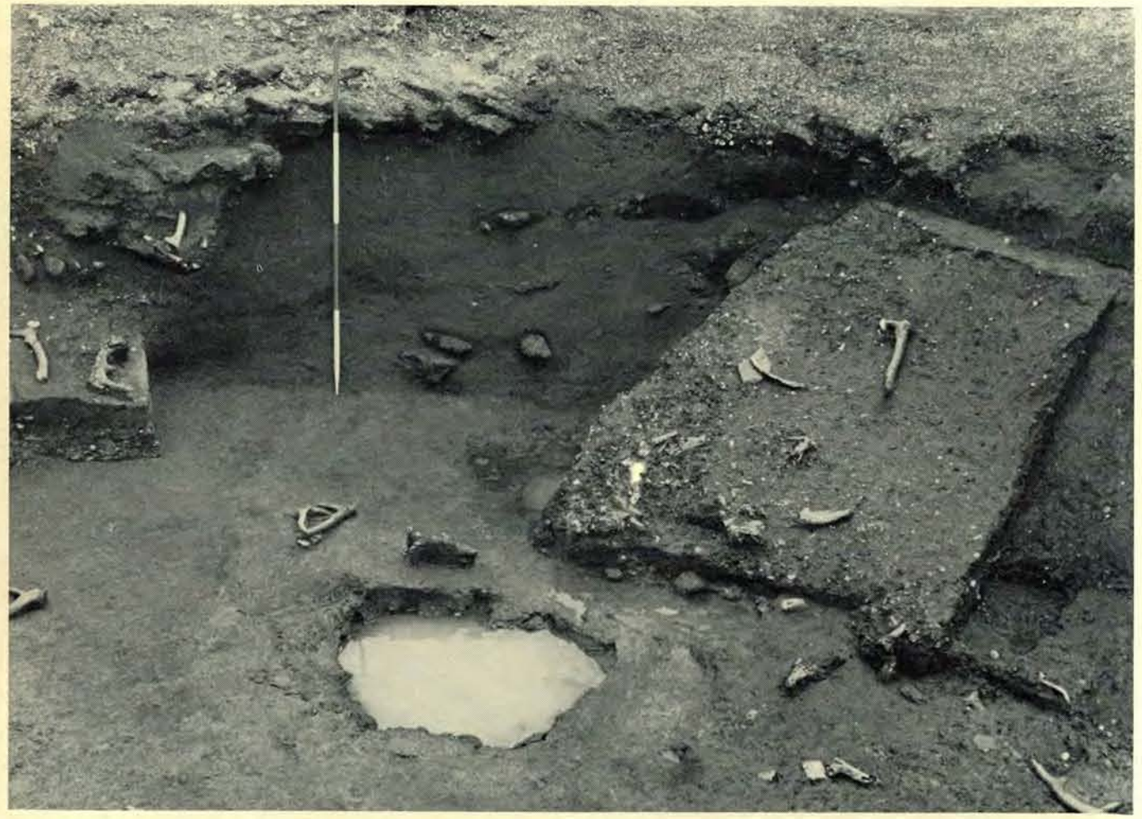
Le buche di Marden contenevano pietre focaie e frammenti di terraglia. Come quelli trovati nel fossato, anche questi appartenevano allo stesso tipo di ceramica Grooved Ware, trovata a Durrington Walls, suggerendoci che questi due luoghi, distanti fra loro solo sedici chilometri, abbiano svolto una funzione pubblica contemporaneamente per un periodo di molti secoli. Può anche darsi, tuttavia, che Durrington Walls abbia avuto una vita piú lunga. Alcuni frammenti di terraglia lí dissotterrati, mostrano l'influenza stilistica tipica di un gruppo di persone emigrate dall'Europa, conosciuto con il nome di Beaker. Questi nuovi arrivati costruivano strumenti di rame e di bronzo, e il loro arrivo segnò il principio della fine del periodo neolitico in Gran Bretagna. Nessuna traccia di frammenti di tipo Beaker è stata trovata a Marden e si può quindi dedurne che Durrington Walls venisse frequentato in un periodo piú tardo.

Questo verrà chiarito probabilmente del tutto, quando le analisi del carbonio-14 compiute sui resti organici ritrovati a Marden verranno rese note.

Sino a oggi, nessun lavoro archeologico è stato intrapreso a Mount Pleasant, il grande monumento nel Dorset. Qui l'aratura ha profondamente inciso sullo stato del terrapieno e del fossato; si può solo vedere che la cerchia, un ovale di 274 metri per 366, aveva una sola via d'entrata, posta nel quadrante di sud-est. Il quarto dei grandi monumenti neolitici, Avebury, è stato invece oggetto d'intensi studi. Ho già accennato al suo terrapieno e al suo fossato. Fra i due si estende una striscia di terreno livellato che varia in larghezza; l'accesso alla cerchia è dato da quattro entrate separate, situate all'incirca a 90 gradi l'una dall'altra. Avebury è il solo in Gran Bretagna ad avere tante entrate.

Come a Stonehenge, il terrapieno di Avebury racchiude un gruppo di monoliti, ma questa è la caratteristica comune ad ambedue. Stonehenge consiste essenzialmente di quattro fila di pietre: due cerchi esterni concentrici e, dentro di essi, due semicerchi a ferro di cavallo, sempre concentrici. Il cerchio piú esterno, che in origine consisteva di 30 monoliti verticali, ha un diametro di circa 30 metri e il terrapieno che lo circonda un diametro di 90 metri. Al contrario, il grande cerchio di pietre di Avebury, immediatamente all'interno del fossato, ha un diametro di piú di 300 metri e in origine può darsi abbia contenuto un totale di 98 grandi monoliti. All'interno di questo insieme di pietre, vi erano due cerchi, sempre di pietre, entrambi piú grandi di Stonehenge. Quello a nord ha un diametro di quasi 50 metri; quello a sud, due metri di piú. I monoliti di Avebury sono blocchi di arenaria locale formati naturalmente e non ricavati dalla roccia. Da secoli, la gente del posto se ne è servita, spezzandoli uno dopo l'altro, e ora non ne rimane che meno della metà di quanti, in origine, avevano formato l'intera struttura.

Nel 1930 un ricco appassionato di archeologia, Alexander Keiller, eseguí degli scavi in alcune zone della cerchia di Avebury. La sua ricerca nel fossato riportò alla luce cosí pochi oggetti da far ritenere che Avebury fosse stata deliberatamente mantenuta pulita dai suoi visitatori neolitici. Sulla superficie originale, sotterrati sotto il terrapieno, Keiller ritrovò dei resti fra i quali dei frammenti di Grooved Ware e due punte di freccia in selce del tipo trasversale, cosicché si può dedurne che il luogo sia stato frequentato nello stesso periodo di Durrington Walls e Marden. Dai tempi di Keiller nessun altro scavo è stato fatto nella cerchia di Avebury.



La maggior parte degli oggetti di Marden, è stata ritrovata all'incrocio del marciapiede nord con il fossato. Nella fotografia si possono vedere vari punteruoli di corno e frammenti di ossa di animali, inclusa parte della mandibola di un maiale, che ancora giacciono nelle stesse posizioni dove sono stati abbandonati dagli antichi visitatori del grande complesso neolitico.

Parte dello scheletro di un essere umano adulto è stata ritrovata tra i rifiuti nel fossato di Marden. Il peso del terreno che lo ricopriva ne ha schiacciato il cranio.

Cosa possiamo dedurre dai dati, anche se sommari, dello studio di tre dei quattro monumenti neolitici piú importanti della Gran Bretagna? Soffermiamoci prima un momento a considerare altri fatti che riguardano Avebury e ciò che lo circonda. Un « viale » di pietre conduce dal monumento a un punto distante quasi 2 chilometri, dove si trova una piccola costruzione di pietre, conosciuta con il nome di « Santuario », formata da cerchi concentrici di pietre verticali. Degli scavi condotti nel 1930 rivelarono, però, che il santuario non era sempre stato una struttura di pietra. All'origine era stato fatto in legno e ricostruito in legno almeno due volte prima di raggiungere la sua definitiva struttura di pietra. Un cerchio di buche, del diametro circa di 4 metri, forma la prima struttura, probabilmente una capanna. Questa venne sostituita da una seconda struttura in legno del diametro di circa 10 metri che, a sua volta venne sostituita dalla terza, sempre in legno, del diametro di circa 18 metri.

I monumenti di pietra, possono quindi in origine essere stati di legno. Per quanto riguarda il Santuario, la cosa è stata provata; solo altri studi potranno provare se si può dire lo stesso per il monumento di Avebury. In questo caso, è interessante la scoperta fatta nel 1920 da William Hawley della Society of Antiquaries, a Stonehenge, quando vennero alla luce molte buche, alcune delle quali possono appartenere al periodo che a noi interessa, anche se la piú gran parte del recinto centrale è ancora inesplorata. A Stonehenge sono state pure ritrovate terraglie del tipo Grooved Ware.

A Durrington Walls vi è un piccolo monumento di pietra solo 55 metri al di fuori del recinto centrale. Noto con il nome di « Woodhenge », fu sottoposto a scavi tra il 1926 e il 1928. Come il suo nome indica, in origine aveva una struttura di legno; i suoi resti sono 6 cerchi concentrici di buche. I cerchi formano un disegno ovale e hanno un diametro massimo di 40 metri.

Stuart Piggott dell'università di Edimburgo, nel 1940, suggerí che le buche significavano la presenza, in passato, di un solo grande edificio, probabilmente con un cortile centrale aperto e un tetto che scendeva, sia all'interno che all'esterno, da un alto colmo centrale. Il mio collega Musson suggerisce, come alternativa, che le buche della costruzione lignea siano i resti di due strutture di legno consecutive, ciascuna con un cortile centrale ma con un solo tetto inclinato all'esterno come a Durrington Walls. Non vi sono indicazioni che suggeriscano quali delle due ricostruzioni sia la giusta.

Tuttavia, è evidente che le tre strutture di Durrington Walls e quella scoperta a Marden, sebbene siano scoperte recenti, non sono le sole strutture in legno conosciute nei monumenti neolitici inglesi. Tre di esse vennero erette consecutivamente nel Santuario, una o due (a seconda di quale interpretazione si preferisca) a Woodhenge, probabilmente una a Stonehenge e vi è la possibilità che ve ne siano altre a Avebury e altre ancora a Mount Pleasant, Durrington Walls e a Marden.

Prima di fare delle congetture sull'uso al quale queste strutture erano destinate, vediamo cosa ci possono rivelare sulla costruzione centrale le rovine di Durrington Walls, preservate in modo ammirevole.

Identificando i resti di carbone trovati nelle buche della cerchia meridionale, si poté sapere che il materiale per la struttura della costruzione posteriore era la quercia. Il diametro dei pali può venir desunto dalla grandezza delle buche che essi occupavano; per ciò che concerne la loro altezza si sono fatti dei calcoli sulla base della ricostruzione di Musson. In aggiunta ai pali, devono essere state usate delle travi di legno piú piccole per controventare e per intelaiare la struttura che sosteneva il tetto di paglia. Dai calcoli fatti risulta che piú di 900 metri lineari di tronchi di varie dimensioni erano

occorsi per costruire i pali per la struttura portante e piú di 1350 metri di legname piú piccolo per travi, travetti e altri elementi. I due pali all'entrata, i piú grossi dell'intera costruzione, pesavano rispettivamente all'incirca 5 e 3,5 tonnellate; il peso totale del legname utilizzato deve essere stato di 260 tonnellate. Si dovrebbero abbattere all'incirca 145 ettari di foresta di quercia per ottenere la stessa quantità di legname, tuttavia questa struttura in legno era solo una delle varie esistenti nella zona. Non è quindi un'esagerazione affermare che la distruzione del patrimonio boschivo del sud dell'Inghilterra deve aver avuto inizio al principio del secondo millennio a.C.

Sebbene vadano considerate molte variabili, è possibile valutare la durata delle costruzioni. Ricerche compiute al Forest Products Research Laboratory, mostrano come la resistenza di un palo di legno conficcato verticalmente nel suolo, è direttamente proporzionale al suo diametro. I pali di quercia, come quelli usati a Durrington Walls, hanno una probabilità di resistenza vitale di circa 15 anni per ogni 2,30 cm di raggio. Calcolando i tempi su questa base, la costruzione posteriore della cerchia meridionale ha resistito da un minimo di 100 a quasi 200 anni. Gli enormi pali all'entrata sarebbero rimasti in piedi rispettivamente per 270 e 315 anni; ma poiché essi non sono degli elementi chiave della struttura, la loro durata non è determinante per valutare la vita complessiva della costruzione stessa. Il probabile investimento in ore lavorative necessarie per tagliare il legname e per erigere la costruzione non pare eccessivo se ammortizzato in piú di un secolo.

Quale era la funzione di questi monumenti lignei? La prima domanda da porsi è se questi fossero delle abitazioni o costruzioni ideate e realizzate per scopi pubblici. Il cortile aperto al centro di Woodhenge e quello centrale ornato di pali decorativi di Durrington Walls, sembrano ambedue piú adatti per cerimonie che per usi domestici.

Il viale di arrivo e la facciata che protegge alla vista la struttura nord di Durrington Walls sono altri aspetti che non sembrano adattarsi a un contesto domestico. Si deve inoltre considerare che l'ultima struttura in legno, il Santuario, fu sostituita da cerchi di monoliti, congiunti al gran recinto di Avebury da un viale. Quest'ultima disposizione in pietra dà certo l'impressione di essere ritualistica. Non può essere stata la stessa cosa per le antecedenti costruzioni in legno? Un'altra ragione per suggerire delle attività sociali, piuttosto che domestiche in tutti questi monumenti lignei, è la natura e la posizione degli oggetti lí ritrovati, in particolare dei frammenti di terraglie. Non si può mettere insieme un solo vaso, sebbene a Durrington Walls, nel fossato e nelle altre parti, si siano trovati enormi quantità di vasellame e alcuni pezzi, trovati in luoghi diversi, appartenessero allo stesso oggetto. È difficile distinguere fra i rifiuti di una occupazione domestica e i detriti lasciati da pratiche religiose; tuttavia il vasellame trovato a Durrington Walls, non suggerisce in alcun modo un impiego domestico di questi luoghi. Un paragone etnografico di questi monumenti, può venir fatto con le « Sedi di Consiglio » degli indiani Creek e Cherokee nel diciassettesimo e diciottesimo secolo, delle quali abbiamo molte descrizioni lasciateci da chi fece i primi viaggi nell'America del nord meridionale. Il paragone è particolarmente interessante perché oltre ad avere delle testimonianze visive, esiste pure una dettagliata descrizione archeologica di una di queste strutture. Essa era stata eretta fra il 1500 e il 1600 d.C. su un promontorio del fiume Savannah, e venne messa alla luce durante gli scavi compiuti da studenti dell'Università di Georgia fra il 1937 e il 1940. Per colmare le lacune che esistono in ambedue le documentazioni, considerate singolarmente, possiamo andare dall'evidenza etnografica a quella archeologica e viceversa, attingendo informazioni da entrambe.

Il naturalista William Bartram, descrivendo una sede del consiglio Creek del 1700, scrisse: « La grande... casa o rotonda... è una costruzione vasta e conica o un duomo circolare, capace di accogliere centinaia di persone. Vi è una sola grande porta che serve anche a immettere luce dal di fuori e a permettere al fumo di uscire quando viene acceso il fuoco ». Nel discutere questa costruzione Bartram dichiara: « Essi fissano per prima cosa nel suolo una fila circolare di pali o tronchi d'albero alti approssimativamente 2 metri, a uguale distanza uno dall'altro, i quali vengono intagliati all'estremità per incastrarvi, tra l'uno e l'altro, una serie di travi o piani di posa; all'interno di questi vi è un'altra serie circolare di pilastri molto larghi e forti, intagliati all'estremità allo stesso modo per accogliere un'altra serie di travi ». Secondo Bartram una delle attività che si svolgevano nella sede del consiglio, era rappresentata dal bere una bevanda sacra chiamata « cassine ». Essendo questa bevanda sacra, anche il vasellame usato in quelle occasioni può aver assunto un carattere speciale.

La sede del consiglio, scavata in Georgia, era parte dell'« Irene Mound ». Oltre ai resti della costruzione circolare, che aveva una sola entrata, un posto adibito a focolare e un diametro esterno di piú di 35 metri, furono messe alla luce un gran numero di abitazioni domestiche di forma quadrata e rettangolare. La forma della struttura principale era evidente dal disegno formato da sei cerchi concentrici di solchi profondi che accoglievano un tempo delle palizzate. Il cerchio piú esterno era il muro della sede del consiglio; gli altri cinque cerchi piú interni costituivano i tramezzi che incorporavano i supporti del tetto. Proprio fuori dal muro esterno, si trovò una grossa fossa per i rifiuti contenente solo i frammenti di recipienti di coccio contemporanei alla struttura stessa. Gli archeologi pensarono che i recipienti fossero stati usati per bere il cassine, e poi messi nella fossa, dopo averli rotti intenzionalmente o per caso. Il paragone fra l'eliminazione del vasellame delle cerimonie degli indiani del Nuovo Mondo, e l'accurata ripartizione a Durrington Walls di alcuni dei pezzi di coccio neolitici, sebbene non completo, fa pensare a dei riti in ambedue i casi.

Un cerchio di buche del diametro di circa 9 m, è stato trovato 30 m all'interno della entrata nord di Marden. Secoli di aratura hanno cancellato tutto fuorché il loro fondo.

Senza troppo sforzo, nonostante la differenza di era di piú di 3000 anni, la descrizione di Bartram sulla sede del consiglio Creek nel diciottesimo secolo, può venire applicata ai monumenti neolitici della Gran Bretagna. Ci viene, cosí, la tentazione di sfruttare la conoscenza che abbiamo dell'uno, per rispondere alle domande che ci poniamo sugli usi sconosciuti degli altri. Ciò, evidentemente, non si può fare, non solo perché ce lo impedisce la diversità di era, ma anche la distanza geografica e le immense differenze di cultura. Tuttavia, in ciò che è minimamente paragonabile, troviamo la conferma che le strutture neolitiche erano adibite a qualche funzione pubblica e non a uso domestico.

Presumendo che questa ipotesi sia corretta, ne conseguono subito altre domande. Queste strutture erano dei templi? Oppure avevano uno scopo piú laico? Potevano avere una funzione allo stesso tempo religiosa e laica? Sopralluoghi fatti con i magnetometri che indicano le discontinuità del suolo, hanno portato a pensare che, un tempo, vi fossero state all'interno della cerchia di Durrington Walls, molte altre costruzioni lignee; cosí come si può pensare di Marden e degli altri luoghi simili. Se questa ipotesi è esatta, si tratta di monumenti aperti al pubblico che, di tanto in tanto, li visitava provenendo da abitazioni ancora non scoperte? Oppure, come nel caso di Irene Mound, essi includevano sia gli edifici pubblici che quelli privati? La struttura di questi ultimi, durante il periodo neolitico, è ancora praticamente sconosciuta, eppure essi devono essere esistiti per provvedere alla mano d'opera necessaria per erigere i grandi terrapieni dell'epoca e per costruire gli edifici in essi racchiusi. Mancando ogni indicazione che questi edifici privati possano essere scoperti altrove, occorre iniziare la loro ricerca proprio all'interno della cerchia di Durrington Walls, di Marden, di Mount Pleasant e di Avebury.

LA BIOSFERA

Il fascicolo monografico di dicembre 1970 di **LE SCIENZE** edizione italiana di **SCIENTIFIC AMERICAN** è dedicato ai problemi della biosfera e all'influsso della tecnologia sull'ambiente. Esso contiene i seguenti contributi:

La biosfera
di G. Evelyn Hutchinson
Come la sottile pellicola di sostanza vivente della Terra è sostenuta da cicli energetici e chimici su grande scala.

Il ciclo energetico della Terra
di Abraham H. Oort
L'energia solare assorbita dalla Terra viene alla fine reirradiata nello spazio extraterrestre ma solo dopo essere stata distribuita sul nostro pianeta dalla circolazione atmosferica e oceanica.

Il ciclo energetico della biosfera
di George M. Woodwell
La vita si mantiene grazie alla quantità finita di energia solare che è fissata dalle piante verdi. Una frazione sempre maggiore di quest'energia viene deviata oggi a diretto vantaggio di un'unica specie: l'uomo.

Il ciclo dell'acqua
di H. L. Penman
L'acqua, il mezzo in cui si sviluppa la vita e sorgente dell'idrogeno a essa necessario, fluisce nella materia vitale soprattutto attraverso il meccanismo della traspirazione.

Il ciclo dell'ossigeno
di Preston Cloud e Aharon Gibor
L'ossigeno fu introdotto nell'atmosfera dai primi organismi vegetali. Essi hanno reso possibile l'evoluzione delle piante superiori e degli animali.

Il ciclo del carbonio
di Bert Bolin
Il ciclo fondamentale si compie tra l'anidride carbonica atmosferica e la materia vivente. Una parte del carbonio, tuttavia, viene accumulata in grandi quantità sotto forma di composti nelle rocce sedimentarie.

Il ciclo dell'azoto
di C. C. Delwiche
L'azoto costituisce il 79 per cento dell'atmosfera, ma non può essere usato direttamente; deve prima essere « fissato » da organismi specializzati o mediante processi industriali.

I cicli inorganici
di Edward S. Deevey jr.
La biosfera è composta in prevalenza da idrogeno, carbonio, azoto e ossigeno. Altri elementi sono, tuttavia, costituenti essenziali della materia vivente: tra essi, in particolare, il fosforo e lo zolfo.

L'industria umana e la biosfera
di Harrison Brown
Materiali come i metalli e il cemento non si riproducono. Il problema è di organizzare cicli di utilizzazione che conservino queste risorse naturali e che impediscano il loro accumularsi sotto forma di rifiuti.

La produzione di alimenti
di Lester R. Brown
Il rapporto tra aumento della popolazione umana e aumento della produzione alimentare pone un problema: quante persone la biosfera può sostenere senza pregiudicare il complesso delle sue operazioni?

La produzione di energia
di S. Fred Singer
Liberando l'energia immagazzinata nei combustibili fossili e nucleari, l'uomo accelera lenti cicli naturali. I prodotti di rifiuto che si hanno in questa produzione vanno a interagire con cicli veloci della biosfera.

L'ingegneria ambientale
di Luigi Mendia
Gli sviluppi della tecnologia vanno controllati secondo una coscienza ecotecnica.

L'Italia e i problemi della biosfera
Tavola rotonda con la partecipazione di: Enzo Capaccioli, Emilio Gerelli, Luigi Mendia, Giorgio Nebbia, Roberto Passino, Mario Pavan, Gabriele Scimemi. Moderatore Felice Ippolito.

Intelligenza e razza

Hanno una base genetica le differenze tra bianchi e negri nei valori di quoziente d'intelligenza (Q.I.)? Due genetisti esaminano criticamente i dati disponibili e concludono che attualmente è impossibile rispondere

di Walter F. Bodmer e Luigi Luca Cavalli Sforza

In quale misura differenze di comportamento tra classi sociali e tra razze potrebbero avere una determinazione genetica? Il problema viene discusso spesso, anche se generalmente non a livello scientifico. Recentemente un esperto di psicologia dell'educazione, Arthur R. Jensen, e un fisico, William Shockley, hanno richiamato l'attenzione sulle differenze medie d'intelligenza, quale viene misurata dal Q.I., tra bianchi e negri degli Stati Uniti. Noi siamo genetisti interessati allo studio dell'interazione tra eredità e ambiente. Lo scopo di questo nostro articolo è di esaminare criticamente, soprattutto per i non genetisti, il significato dei termini razza e Q.I., nonché le metodologie utilizzate per stabilire in che misura il Q.I. sia ereditario. Questo esame può fornire la base per una valutazione oggettiva della evidenza riguardante l'esistenza di una componente genetica nelle differenze di Q.I. tra razze e tra classi.

Prima di tutto bisognerebbe definire i termini « eredità », « intelligenza » e « razza ». Il termine « eredità » si riferisce a tutte le caratteristiche dell'individuo che questi eredita dalle precedenti generazioni. L'unità funzionale primaria dell'eredità è il gene. L'intero corredo genetico di un individuo è indicato con il termine di genoma e consiste nell'uomo di circa dieci milioni di geni. Alcuni di questi geni, e la loro espressione, possono essere analizzati a livello biochimico. Caratteri comportamentali complessi come l'intelligenza subiscono però probabilmente l'influenza dell'azione combinata di molti geni. A tal riguardo giova osservare subito che mentre è possibile fare previsioni attendibili circa l'ereditarietà di quelle differenze che sappiamo essere determinate da uno o da pochi geni, non è possibile fare altrettanto circa l'ereditarietà di caratteristiche piú complesse, perché mancano ancora adeguati mezzi di indagine.

Che cosa è l'intelligenza? Non è facile formulare una rigorosa e obiettiva definizione di questo complicato carattere, ma per i fini di questa discussione ci si può limitare a qualità che possono essere oggettivamente osservate e misurate. Fra gli strumenti atti a questa misurazione si annovera il reattivo mentale di Stanford-Binet, realizzato per misurare le capacità di apprendere, o, piú in generale, la capacità di trarre profitto dall'esperienza.

I reattivi per misurare l'intelligenza si fondano sulla risoluzione di brevi problemi di vario genere, nonché sulla risposta a domande semplici. Il punteggio totale viene standardizzato per una certa età confrontandolo con i valori di un grande campione di una determinata popolazione (per esempio, i bianchi nati negli Stati Uniti). Il punteggio finale standardizzato che va sotto il nome di Q.I., viene abitualmente espresso in una scala che pone la media della popolazione di riferimento uguale a 100, con una distribuzione tale che il 70 % degli individui hanno un Q.I. tra 85 e 115 e il 5 % un Q.I. o sotto 70 o sopra 130 (la misura di variabilità indicata con il termine di deviazione standard corrisponde dunque, nel caso del Q.I., a circa 15 punti).

Con il reattivo di Stanford-Binet e con gli altri reattivi dello stesso tipo, si ottengono risultati suscettibili di reciproco confronto. Sono stati compiuti tentativi anche piú ambiziosi per misurare il « fattore generale dell'intelligenza », e vi sono psicologi tanto ottimisti da ritenere che i reattivi di questo tipo possano effettivamente misurare una abilità « innata » potenziale. Tuttavia bisogna notare che tutti i reattivi mentali saggiano necessariamente l'abilità posseduta da un soggetto a una determinata età della sua vita. Poiché tale abilità è il prodotto di una combinazione fra la disposizione innata e l'esperienza del soggetto stesso, i reattivi d'intelligenza sono necessariamente test di abilità acquisita.

Questa limitazione risulta confermata dal fatto che il valore diagnostico di tutti i test d'intelligenza è funzione del particolare ambiente culturale. L'applicazione di un determinato reattivo a soggetti di cultura differente da quella per cui è stato realizzato è difficile e in qualche caso impossibile. Fino a oggi i tentativi di costruire reattivi assolutamente « liberi da influenze culturali » sono regolarmente falliti.

L'utilità dei reattivi mentali può essere verificata attraverso l'esame della loro *attendibilità* (che è la costanza a breve termine), *stabilità* (che corrisponde invece alla costanza a lungo termine) e *validità*. Per quanto riguarda il reattivo di Stanford-Binet la differenza media tra prove ripetute a brevi intervalli varia da 5,9 punti – quando il Q.I. è di 130 – a 2,5 punti – quando il Q.I. è inferiore a 70 – indicando una riproducibilità piuttosto alta.

A lungo termine la consistenza è meno marcata, soprattutto se il soggetto ha subito la prima prova in età inferiore ai sei anni. La ripetizione della prova a distanza di anni può far registrare forti discrepanze (persino di 20 o 30 punti), tanto piú pronunciate quanto piú lungo è l'intervallo fra una prova e l'altra.

La validità di ogni reattivo viene giudicata in riferimento ai suoi scopi preditivi. Se lo scopo è quello di predire future prestazioni scolastiche allora la validità è misurata dalla bontà delle previsioni del Q.I. riguardo alle prestazioni. A ogni modo tutte le predizioni hanno un carattere di probabilità, nel senso che un alto Q.I. si associa a un buon rendimento scolastico in un elevato numero di casi, ma non in tutti. Tuttavia si è in genere d'accordo che vi è una alta correlazione tra Q.I. e successo scolastico. La stessa correlazione esiste in ordine al successo nelle professioni e, piú in generale, nella società. I test di intelligenza hanno dunque un certo valore preditivo, in senso probabilistico. In questo senso si può dire che i test per la misurazione del Q.I. hanno qualche validità.

Le razze sono sottogruppi che si differenziano nell'ambito di una determinata specie. La specie umana, come ogni altra specie, è composta di individui cosí somiglianti gli uni agli altri per ciò che riguarda la costituzione genetica che in linea teorica qualunque maschio può congiungersi a qualunque femmina e dar vita a una prole fertile. La specie umana è caratterizzata da un'alta mobilità territoriale, tanto che nel corso dell'evoluzione essa si è distribuita su tutta la superficie della Terra. Tuttavia sono molti gli individui che, anche ai nostri giorni, trascorrono l'intera esistenza sempre nel medesimo luogo. Questo tipo di comportamento, insieme con le barriere geografiche e quelle d'altra natura, fa sí che in diverse parti del mondo esistono popolazioni in condizioni di accentuato « isolamento produttivo ».

Poiché i diversi habitat di una specie possono differire profondamente tra loro per ciò che concerne le caratteristiche ecologiche – quali la composizione del suolo, il clima, la flora e la fauna – la selezione naturale, cioè il processo per cui preferenzialmente sopravvivono e si riproducono i soggetti meglio adattati al loro habitat, porta inevitabilmente alla formazione di caratteristiche che differenziano l'uno dall'altro i gruppi isolati. In piú, l'isolamento riproduttivo favorisce l'emergenza di un fattore di differenziazione correlato con le fluttazioni statistiche casuali che le caratteristiche geniche di qualsiasi popolazione subiscono nel succedersi delle generazioni: tale processo va sotto il nome di deriva genetica.

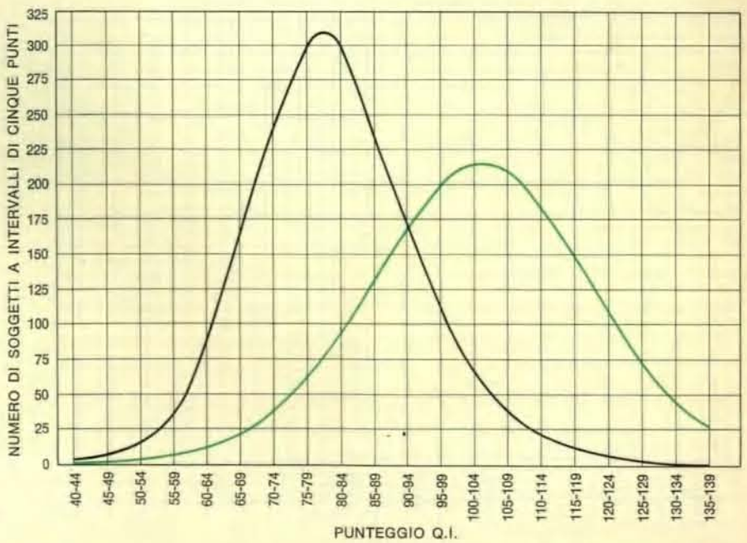
Nell'ambito di una specie i sottogruppi isolati tendono dunque a differenziarsi. Il processo si svolge con estrema lentezza: centinaia o addirittura migliaia di generazioni possono essere necessarie perché certe differenze biologiche diventino apprezzabili a prima vista. A ogni modo, noi indichiamo quei sottogruppi con il termine di razze quando, per il tempo trascorso, le caratteristiche che li differenziano sono diventate palesi.

Nella specie umana la differenziazione biologica è di solito accompagnata o preceduta da una differenziazione culturale: un processo, questo, che si svolge con una velocità di gran lunga superiore a quella dell'evoluzione biologica. I due tipi di differenziazione inevitabilmente interagiscono. Infatti le differenze culturali possono contribuire alla perpetuazione delle barriere geografiche che hanno determinato l'isolamento riproduttivo. Per esempio, differenze d'ordine religioso possono promuovere l'isolamento riproduttivo. Negli Stati Uniti le differenze relative alla pigmentazione cutanea, riflesso di una differenza biologica, riducono le probabilità di matrimonio fra i gruppi razziali. Tuttavia la rarità di questi scambi è probabilmente attribuibile anche a un atteggiamento psicologico che non dipende direttamente dalla differenza di colore ma piuttosto da divergenze culturali che si accompagnano a quel tratto somatico.

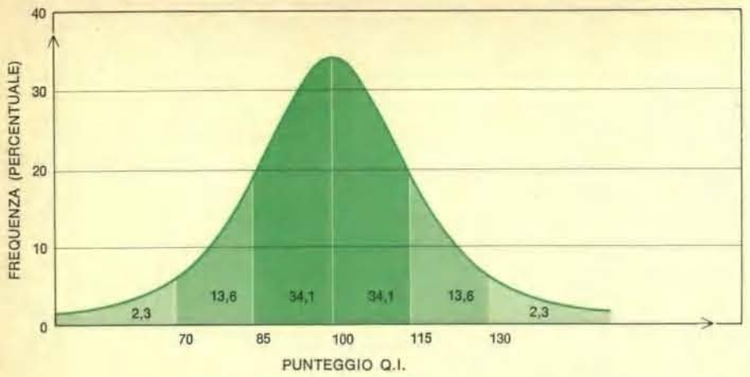
È straordinariamente difficile stabilire quale sia la rispettiva incidenza dei fattori biologici e dei fattori culturali nella determinazione di fatti complessi quali le differenze di comportamento, comprese quelle che distinguono le razze. A tal riguardo è utile considerare prima di tutto le differenze razziali che possono essere facilmente attribuite a fattori biologici. È chiaro, per esempio, che le differenze relative alla pigmentazione cutanea sono generalmente di natura biologica. In certi casi il carattere della pigmentazione cutanea può essere determinato da un qualche fattore non genetico, che opera durante la vita di un individuo (l'irradiazione solare è uno di questi fattori). Si tratta allora di un adattamento fisiologico a breve termine, quasi sempre reversibile. A parte questi processi adattativi, le differenze di pigmentazione cutanea fra le diverse razze o fra i tipi di una razza hanno origine genetica.

In realtà molte differenze tra individui sono interamente sottoposte al controllo genetico, e perciò sottratte a qualsiasi processo di adattamento fisiologico, sia pure di modesta portata come quello ricordato a proposito della cute. Le differenze genetiche di questo tipo, quando le versioni alternative dei geni che le determinano si riscontrano in una determinata popolazione con una certa frequenza, vanno sotto il nome di polimorfismi genetici. Di solito esse possono essere rilevate mediante l'analisi biochimica o immunologica, come nel caso dei gruppi sanguigni del sistema ABO (in questo sistema si distinguono quattro gruppi sanguigni, in rapporto alla distribuzione di tre geni: A, B, O).

Vi sono profonde differenze fra le varie razze per quanto riguarda l'incidenza statistica dei geni polimorfici. Per esempio, nelle popolazioni orientali la frequenza dei geni A, B, O è rispettivamente del 49 per cento, del 18 per cento e del 65 per cento; nelle popolazioni caucasiche è invece del 29 per cento, del 4 per cento e del 60 per cento. Questi polimorfismi sono di prezioso aiuto quando si vuole stabilire la natura e l'entità delle differenze e delle somi-



Per quanto riguarda il Q.I. la differenza tra bianchi e neri statunitensi emerge dal confronto tra un campione rappresentativo di bianchi (*curva colorata*) e un campione di 1800 scolari negri dell'Alabama, della Florida, della Georgia, del Tennessee e della Carolina del sud (*curva nera*). Wallace A. Kennedy della Florida State University, che si è occupato dell'indagine, ha accertato che per il secondo gruppo il Q.I. medio era 80,7, mentre per il campione dei bianchi era 101,8, con una differenza di 21,1 punti. Tra i due campioni si nota una marcata sovrapposizione, ma anche una notevole differenza tra le due medie. Studi diversi indicano una differenza tra i 10 e i 20 punti.



La curva registra la distribuzione normale di frequenza del Q.I. per una popolazione con media 100. La deviazione standard, cioè la misurazione di variazione piú comune, è di circa 15 punti, e la distanza nei due sensi dalla media è misurata in multipli della deviazione standard. Pertanto, circa il 34 % ha un valore Q.I. tra 85 e 100, mentre un altro 34 % della popolazione registra valori tra 100 e 115 (*colore scuro*). I soggetti con punteggio molto elevato o molto basso sono una parte minima: solo il 2 % circa con Q.I. inferiore a 70, e un altro 2 % con Q.I. superiore a 130 (*colore chiaro*).

glianze esistenti fra le diverse razze: sono infatti dovuti a fattori d'ordine esclusivamente genetico.

L'analisi dei polimorfismi genetici mette in luce tre fatti molto importanti circa la natura delle differenze genetiche che contraddistinguono le singole razze o i diversi tipi di una razza. Primo, il grado di variabilità che si osserva nell'ambito di una qualsiasi popolazione supera di gran lunga le differenze medie tra popolazione e popolazione. Secondo, le differenze fra popolazione e popolazione, tra razza e razza, sono piú d'ordine quantitativo che qualitativo, nel senso che esse generalmente dipendono dalla diversa frequenza di una data serie di geni e non dalla presenza, in ciascuna popolazione o razza, di geni peculiari. In altre parole, una data combinazione genica può essere riscontrata in quasi tutte le razze: ciò che varia da razza a razza è la sua frequenza. Terzo, per effetto di processi di ibridizzazione, che a dispetto dell'isolamento riproduttivo si verificano di continuo nelle zone di frontiera dei gruppi razziali, e altresí per la formazione di gruppi ibridi dovuta a una migrazione recente che sia seguita da un profondo mescolamento di gruppi precedentemente isolati, i caratteri che differenziano una razza dall'altra sono *caratteri continui*: e con questa espressione del linguaggio statistico si vuol dire che la loro variazione passa attraverso numerose gradazioni intermedie di gruppi o tipi di « confine ».

Come abbiamo già rilevato l'intelligenza è probabilmente una caratteristica complessa, cioè sottoposta al controllo di molti geni. Le deviazioni estreme dai livelli medi, quali si verificano in casi di grave ritardo mentale, possono nondimeno essere attribuite alle modificazioni di un unico gene. Le deviazioni di questo tipo sono utili per descrivere importanti meccanismi attraverso cui i fattori genetici influenzano il comportamento. Si consideri per esempio quella particolare malattia del metabolismo protidico che va sotto il nome di fenilchetonuria. Essa si presenta nei soggetti che ricevono da ambedue i genitori una versione mutata del gene designato al controllo dell'enzima che converte l'amminoacido fenilalanina in un altro amminoacido, la tirosina. Quando in soggetti omozigoti il gene è presente in questa versione mutata l'enzima è assente, sicché nel sangue e nel cervello di tali soggetti si verifica un accumulo di fenilalanina che causa un grave ritardo mentale (*oligofrenia fenilpiruvica*). Se fin dai primi giorni di vita si impedisce l'accumulo di fenilalanina somministrando una dieta povera di questo amminoacido l'accumulo viene impedito e il ritardo mentale non si verifica.

La differenza fra la concentrazione ematica della fenilalanina nei soggetti fenilchetonurici e quella dei soggetti normali, strettamente correlata all'attività primaria del gene la cui alterazione provoca fenilchetonuria, permette di distinguere nettamente due classi genetiche di soggetti (*vedi l'illustrazione nella pagina 40, in basso*). Quando si confronta la curva relativa alla distribuzione di queste differenze con la curva relativa alla distribuzione del Q.I. i soggetti affetti da fenilchetonuria risultano nettamente distinguibili da quelli che hanno una normale concentrazione ematica di fenilalanina anche sotto l'aspetto dello sviluppo intellettuale, tanto è lieve il grado di sovrapposizione delle due curve. Ciò riflette semplicemente il fatto che il genotipo fenilchetonurico, cioè la costituzione genetica che porta alla fenilchetonuria, è associato a un gravissimo ritardo mentale. Se invece si confrontano le differenze relative alle dimensioni della testa e al colore dei capelli (i soggetti fenilchetonurici tendono a presentare microcefalia e capelli biondissimi) le curve mostrano un notevole grado di sovrapposizione. Ciò significa che la misura di queste caratteristiche somatiche non riesce utile per distinguere il genotipo fenilchetonurico da quello normale anche se bisogna dire che il gene della fenilchetonuria influenza le dimensioni della testa e il colore dei capelli. Ciò dipende dal fatto che nei soggetti normali si osservano ampie variazioni per quanto riguarda tali caratteristiche. Si deve perciò concludere che le differenze genetiche tra soggetti fenilchetonurici e soggetti normali sono la causa principale delle variazioni del tasso ematico di fenilalanina, ma incidono solo in misura secondaria sulle variazioni relative alle dimensioni della testa e al colore dei capelli.

La natura della fenilchetonuria dimostra un altro fatto importante: l'espressione di un gene è profondamente influenzata dall'ambiente. Esistono notevoli differenze fra i fenilchetonurici per quanto riguarda i valori della concentrazione ematica di fenilalanina. Ciò significa che la differenza genetica implicata nella fenilchetonuria è lungi dall'essere l'unico fattore, e neppure il piú importante, nella determinazione del livello ematico di questo amminoacido. È chiaro che le differenze dietetiche hanno effetti di rilievo, dal momento che somministrando a un fenilchetonurico una dieta povera di fenilalanina se ne abbassa la concentrazione ematica fino a valori quasi normali. Se un soggetto riceve il gene fenilchetonurico da uno solo dei genitori, il suo sviluppo mentale non risulta alterato in modo clinicamente sensibile, e nondimeno egli tende ad avere una concentrazione ematica di fenilalanina piú elevata di quella normale. Tale concentrazione dipende dunque da una combinazione di fattori genetici e ambientali. Pertanto se si stabilisce la misura in cui i fattori genetici contribuiscono alla variazione complessiva si arriva altresí a stabilire quale sia l'importanza delle differenze genetiche nella determinazione di questo tipo di variazione quantitativa.

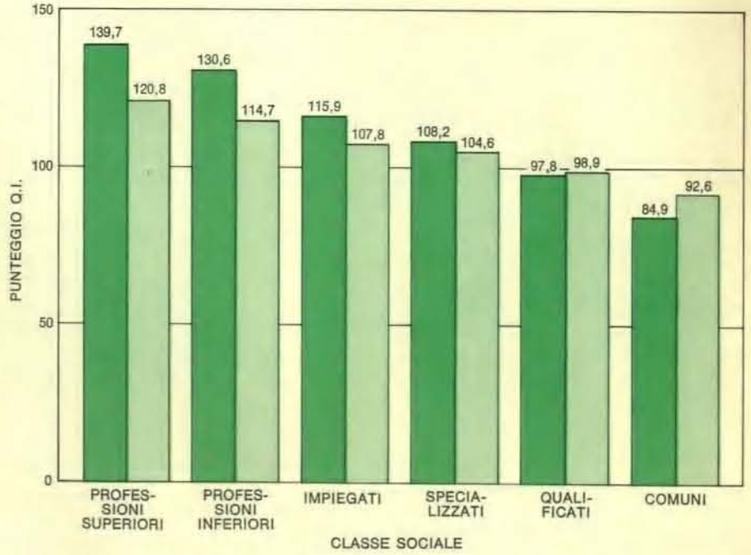
Quando noi ci volgiamo all'analisi di una caratteristica complessa come il Q.I., sottoposta al controllo di molti geni, ciascuno dei quali esercita, mediamente, un'influenza modesta, possiamo anche supporre che tale caratteristica sia influenzata, in modo piú spiccato, anche da tutta la storia precedente dell'individuo e da una serie di altri fattori esterni, non-genetici, che possono tutti insieme essere designati con il termine di « ambiente ». Per distinguere l'uno dall'altro gli effetti di questi vari fattori bisogna ricorrere all'analisi statistica. C'è un esperimento approntato dalla natura stessa che consente la distinzione, sia pure approssimativa, fra fattori genetici e fattori ambientali. Questo esperimento è dato dall'esistenza di due tipi di gemelli: gemelli monovulari, che derivano da un unico zigote, cioè dalla fecondazione di una cellula-uovo e gemelli biovulari, che derivano da due distinti zigoti, cioè dalla fecondazione simultanea di due distinte cellule-uovo. I primi hanno il medesimo corredo genetico, e perciò sono anche detti « gemelli identici »; i secondi hanno un diverso corredo genetico, e perciò vengono detti « gemelli fraterni ».

Senza dubbio la differenza fra i due membri di una coppia di gemelli monovulari dipende esclusivamente da fattori ambientali. Pertanto si può supporre che la distribuzione di tali differenze in un certo numero di coppie gemellari permetta di stabilire in che misura due soggetti possano differire esclusivamente a causa di fattori ambientali. I membri della coppia gemellare di solito non hanno lo stesso Q.I.: vi può essere fra l'uno e l'altro persino una differenza di 20 punti, anche se nella maggior parte dei casi essa non supera i 10 punti. Da ciò si può desumere che i fattori ambientali possono influire sul Q.I. determinando fra soggetto e soggetto differenze il cui valore medio è uguale, o leggermente superiore, al valore delle differenze che si riscontrano fra i diversi Q.I. volta a volta presenti nello stesso soggetto che sia stato sottoposto a diverse prove per un certo periodo di tempo.

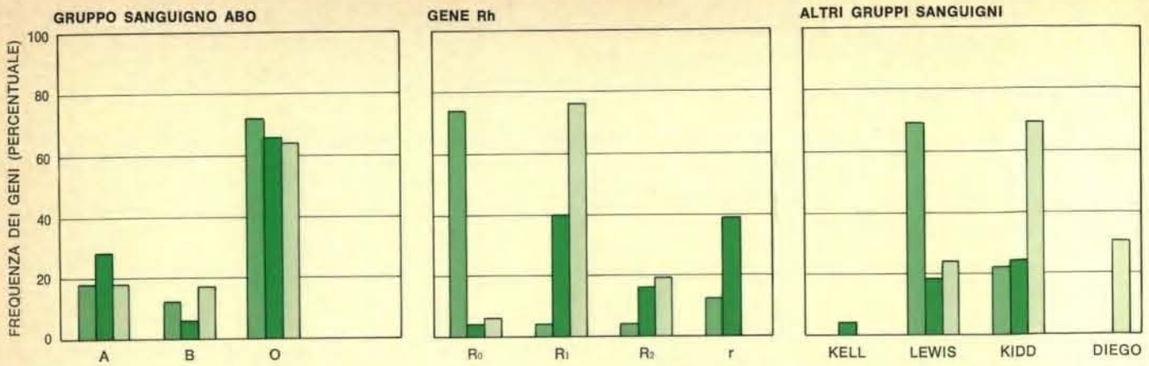
Per stabilire se esistono o no differenze di Q.I. dovute a fattori genetici, e per determinare la loro entità, volgiamoci ai gemelli biovulari. L'osservazione di questo tipo di gemelli in effetti consente di affermare che in questo caso le differenze non sono dovute soltanto a fattori ambientali ma anche a fattori genetici. Le differenze di Q.I. che possono sussistere tra gemelli biovulari hanno una ampiezza maggiore di quelle riscontrate fra gemelli monovulari, e ciò dimostra che la diversità del corredo genetico, sommandosi ai fattori ambientali di differenziazione, aumenta la differenza complessiva fra i due membri della coppia gemellare. Da ciò si può desumere che i fattori genetici possono contribuire a stabilire una differenza di Q.I. anche fra due individui qualsiasi.

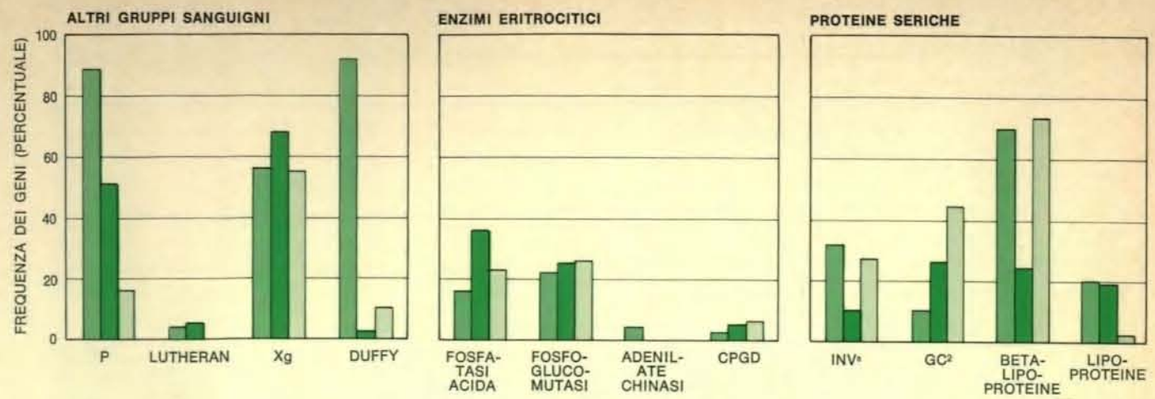
Potrebbe sembrare che i dati relativi ai gemelli possano fornirci facilmente la misura dell'importanza che i fattori genetici e quelli ambientali hanno nelle determinazioni del Q.I. Si può pensare infatti che si possa ottenere un buon indice della rispettiva importanza dei fattori dell'uno e dell'altro ordine mettendo a confronto la differenza media rilevata fra i gemelli monovulari e la differenza media rilevata fra i gemelli biovulari. (Si noti che nelle moderne analisi statistiche abitualmente si calcola non la media delle differenze ma la media del loro quadrato. Un tal valore può essere confrontato con la varianza, che è una nota misura di variazione, o addirittura essere convertito in essa).

Vi sono tuttavia due fondamentali e opposte ragioni per cui questo semplice metodo di misurazione non è del tutto soddisfacente. Primo, la differenza tra due gemelli biovulari costituisce solo una parte delle differenze genetiche che possono sussistere tra due individui. I gemelli biovulari si assomigliano come si assomigliano due fratelli germani, e tuttavia la loro somiglianza è piú forte di quella che può sussistere fra due soggetti presi a caso da una certa popolazione: in altre parole, le differenze genetiche medie che si riscontrano fra gemelli biovulari messe a confronto con le differenze genetiche medie che si riscontrano tra due soggetti presi a caso risultano nettamente minori. Secondo, le differenze d'origine ambientale tra due gemelli costituiscono solo una parte di tutte le differenze di identica origine che possono sussistere tra due individui, sia pure appartenenti alla stessa famiglia. Anche nell'ambito della stessa famiglia le differenze d'origine ambientale tra due gemelli sono meno numerose di quelle che si riscontrano fra fratelli germani: per esempio, non esiste per essi quel particolare fattore ambientale di differenziazione collegato con l'ordine delle nascite. Per questa ragione le differenze fra fra-



Come rivela l'indagine condotta da Cyril Burt dell'Università di Londra, esiste una relazione stretta tra classi sociali e intelligenza. Le colonnine a sinistra indicano che il Q.I. medio per le professioni superiori (*colonna scura*) è 139,7 e che i figli di questi professionisti hanno un Q.I. medio pari a 120,8 (*colonna chiara*). La seconda coppia di colonne indica che le professioni inferiori hanno un Q.I. medio di 130,6 e che i figli di questi altri professionisti hanno Q.I. medio 114,7. La terza coppia di colonne indica che gli impiegati hanno un Q.I. medio di 115,9 e i loro figli di 107,8. La quarta coppia mostra un Q.I. medio di 108,2 per gli operai specializzati e di 104,6 per i loro figli. La quinta coppia indica un Q.I. medio di 97,8 per i qualificati e di 98,9 per i loro figli. La sesta coppia di colonne per gli operai specializzati indica, rispettivamente per padri e figli, i valori di 84,9 e 92,6. Il Q.I. medio delle mogli (che qui non compare) è in buona correlazione con quello dei mariti. Al di sopra della media il Q.I. dei figli tende a essere inferiore a quello dei genitori. Il contrario avviene al di sotto della media. La mobilità sociale conserva tale distribuzione, in quanto il Q.I. tende a crescere nei soggetti che lo hanno già elevato e a diminuire in quelli che lo hanno piú basso.





Le frequenze dei geni polimorfi presso gli africani, i caucasici e gli orientali forniscono un elemento di differenziazione tra le tre razze. (Per gene polimorfo si intende quello appartenente a un gruppo capace di determinare la variabilità di un carattere). Qui vediamo circa la metà dei sistemi polimorfi nell'uomo. Le differenze medie di frequenza tra africani (*in colore*) e caucasici (*colore scuro*) sono del 22 %, tra africani e orientali (*colore chiaro*) del 30 % e tra caucasici e orientali del 22 %.

telli germani tendono a essere piú marcate che non fra gemelli biovulari. D'altra parte si ha ragione di credere che fra gemelli monovulari le differenze dovute all'ambiente per il particolare tipo di relazioni che essi tendono a stabilire con gli altri siano minori di quelle che si riscontrano fra gemelli biovulari. In breve, il confronto fra gemelli monovulari e quello tra gemelli biovulari, fa apparire trascurabile il peso delle differenze genetiche e considerevole invece quello delle differenze ambientali.

Per superare tutte queste difficoltà bisogna cercare di utilizzare tutti i possibili confronti tra consanguinei di vario tipo e grado. I dati relativi ai gemelli costituiscono solo un caso particolare. Per ragioni tecniche si misurano piú spesso le somiglianze che le differenze fra due serie di valori, per esempio il Q.I. dei genitori e quello dei figli. Questa misura di somiglianza è chiamata coefficiente di correlazione, ed è uguale a 1 quando nelle due serie di misure i valori sono identici, o, piú in generale, quando un valore può essere espresso come funzione lineare dell'altro. Il coefficiente di correlazione è invece uguale a 0 quando le due serie di misure sono completamente indipendenti, mentre ha un valore intermedio se la relazione tra le due serie è tale che il valore dell'una tende ad aumentare quando aumenta l'altra.

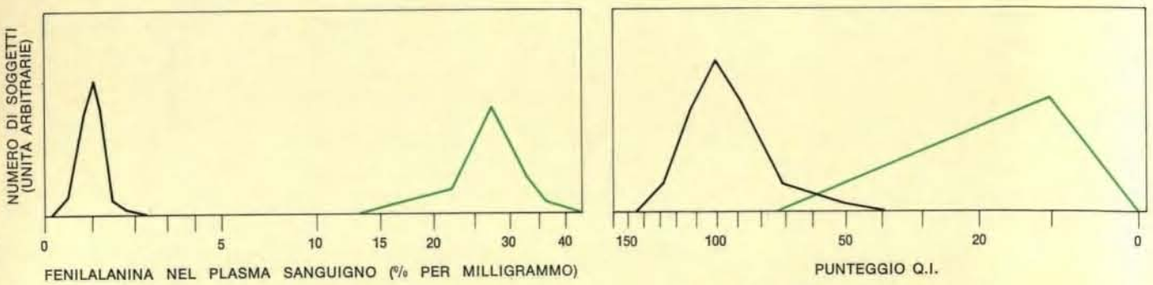
In ordine al Q.I. i valori medi del coefficiente di correlazione tra genitori e figli o tra membro e membro di coppie di fratelli comuni è risultato assai vicino a 0,5. Questo effettivamente è il valore che ci si poteva attendere sulla base del piú semplice dei modelli genetici possibili, sulla base cioè di un modello genetico secondo il quale il Q.I. è sottratto all'influenza di tutti i fattori ambientali ed è esclusivamente determinato in via genetica, senza interferenze d'altro tipo. Sembra tuttavia che tale valore sia il risultato di un complicato gioco di coincidenze. Diversi fattori di complicazione, quali differenti modalità dell'azione genica, la tendenza al matrimonio fra persone che si somigliano, l'esposizione dei membri di una stessa famiglia agli stessi fattori ambientali – si equilibrano sulla bilancia in modo che il risultato coincida con quello del modello genetico piú semplice. Se noi ignorassimo queste possibili complicazioni e coincidenze potremmo ingenuamente concludere (contro altre prove, come quelle che derivano dall'osservazione dei gemelli) che il Q.I. è determinato interamente dai meccanismi piú elementari dell'ereditarietà biologica.

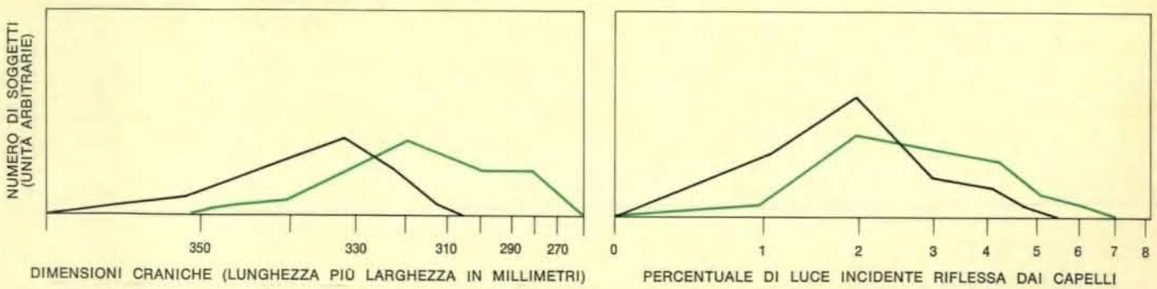
È invece necessario cercare i mezzi atti a determinare sia la rispettiva importanza dei fattori ambientali e dei fattori genetici, in modo da prendere in considerazione molti dei fattori di complicazione. In teoria questa misura può essere realizzata calcolando i quozienti che sono noti sotto il nome di stime di ereditabilità. Per capire ciò che si intende misurare con questi quozienti si consideri una situazione semplificata. Si immagini che sia possibile identificare il genotipo di ogni individuo relativamente ai geni che influenzano il Q.I. In tal caso i soggetti caratterizzati dallo stesso genotipo possono essere raggruppati insieme, le differenze tra i soggetti appartenenti al medesimo gruppo potranno essere attribuite a fattori ambientali, e sarà possibile pertanto misurare l'ampiezza della distribuzione di tali differenze. Per semplificare ulteriormente, si assuma che l'ampiezza della variazione del Q.I. dovuta a fattori ambientali sia la stessa per ogni genotipo. Se noi misuriamo il Q.I. di tutti gli individui di una data popolazione otteniamo una distribuzione che ci presenta la variazione totale del Q.I. Nell'ambito di ciascun genotipo la variazione è di origine ambientale. La differenza tra il valore della variazione totale e il valore della variazione di origine ambientale permette di determinare quanto della variazione totale può essere attribuito alle differenze genetiche. Questa componente quando espressa come frazione della variazione totale, è una possibile misura dell'ereditabilità.

Tuttavia la stima della componente della variazione totale che può essere attribuita alle differenze genetiche (in base ai dati che si riferiscono alle correlazioni tra affini) in pratica dipende sempre dalla costruzione di un modello genetico specifico e ha pertanto i limiti di tutti i modelli. Un problema sta nel fatto che vi è un certo numero di definizioni alternative dell'ereditabilità, ognuna delle quali risulta collegata alla scelta di un particolare modello genetico, perché le variazioni genetiche possono avere molte componenti, e queste a loro volta differenti significati. Spesso si usa una definizione di ereditabilità che riguarda unicamente gli aspetti della variazione genetica che generalmente si ritengono importanti nella riproduzione di piante e animali. Rispetto a questi casi si parla di ereditabilità in senso stretto. Se invece si usa una definizione di ereditabilità che prenda in considerazione tutti i fattori genetici di variazione si parla di ereditabilità in senso lato. Le stime di ereditabilità variano a seconda della definizione prescelta. Nel primo caso saranno ovviamente minori che nel secondo.

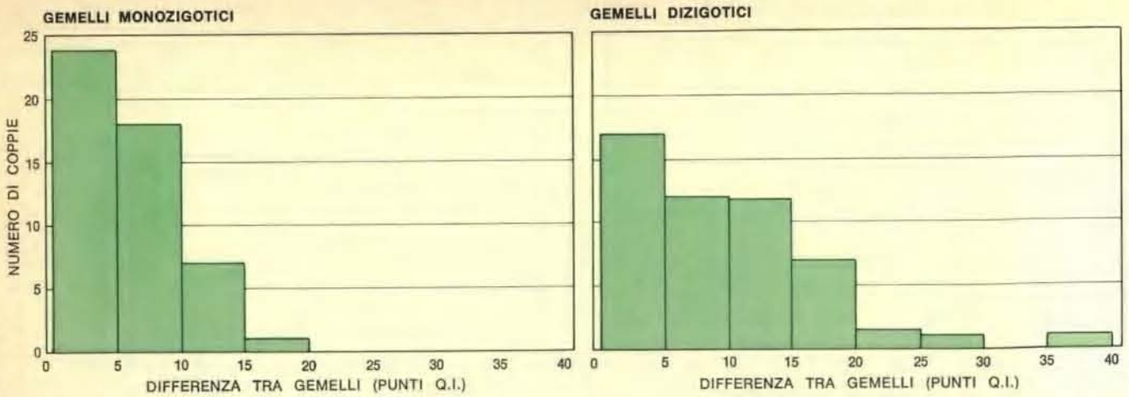
Le differenze tra queste stime di ereditabilità possono essere valutate con sufficiente precisione in termini di modelli genetici specifici. Tali differenze possono essere notevoli. Tipiche stime di ereditabilità del Q.I. (ottenute sulla popolazione londinese al principio degli anni '50, secondo i dati di Cecil Burt) danno per l'ereditabilità in senso stretto valori dal 45 per cento al 60 per cento, per l'ereditabilità in senso lato dall'80 per cento all'85 per cento.

Un'altra difficoltà di rilievo in cui ci si scontra quando si procede a stime di ereditabilità è data da quell'insieme di processi che si designa con il termine di « interazione genotipo-ambiente ». La difficoltà sta nel fatto, che non vi è una chiara possibilità di predire quale Q.I. determinati genotipi potranno conseguire in determinati ambienti. Un dato genotipo potrà avere uno sviluppo intellettuale migliore in un ambiente piuttosto che in un altro, ma questo





I livelli di fenilalanina nel plasma sanguigno che compaiono nella coppia di curve a sinistra servono a distinguere i soggetti portatori di una doppia dose del gene difettoso che determina elevati valori fenilalaninici (*curva colorata*), cioè l'affezione nota come fenilchetonuria, dai soggetti con livelli fenilalaninici normali (*curva nera*). La seconda serie di curve rivela come questo genotipo abbia un'incidenza diretta sull'intelligenza: i fenilchetonurici (*curva colorata*) presentano bassi quozienti d'intelligenza poiché l'accumulazione nel sangue e nei tessuti nervosi della fenilalanina e dei suoi prodotti danneggia il cervello. I soggetti con gene funzionante (*curva nera*) hanno Q.I. normali. Nella terza coppia di curve i valori fenilalaninici sono riferiti alle dimensioni craniche (come somma della lunghezza piú la larghezza del capo), mentre nel quarto diagramma i livelli di fenilalanina sono riferiti al colore dei capelli (come percentuale di luce a lunghezza d'onda di 700 millimicron riflessa dai capelli). È evidente in entrambi i casi il notevole effetto del genotipo fenilchetonurico sulle caratteristiche in esame: il fattore di riflessione dei capelli è maggiore mentre le dimensioni craniche risultano minori (*curve in colore*) per i soggetti fenilchetonurici rispetto agli individui normali (*curve scure*). Tuttavia dai disegni risulta altrettanto evidente come queste caratteristiche siano distribuite in modo tale che non possono servire a distinguere i soggetti ammalati da fenilchetonuria da quelli sani.



La sperimentazione diretta basata sui dati di Q.I. raccolti da Horatio H. Newman dell'Università di Chicago fornisce una misura generica dell'incidenza relativa dell'ereditarietà e dell'ambiente sull'intelligenza. Il grafico a sinistra mostra le differenze di Q.I. tra i gemelli facenti parte di cinquanta coppie. Si tratta di gemelli monozigotici, ossia nati dal medesimo ovulo e in possesso di genotipi identici. Le differenze sono in questo caso molto deboli: in 24 coppie (pari a quasi la metà del campione) la differenza in punti va da zero a cinque. Solo per una coppia si è avuta una differenza tra 15 e 20 punti. In media la differenza tra i gemelli di una stessa coppia è di 5,9 punti. Dato che nelle coppie i genotipi sono identici, si può affermare che l'incidenza dell'ambiente sia trascurabile. Il secondo grafico si riferisce alle differenze di Q.I. riscontrate in 45 coppie di gemelli dizigotici, ossia nati da ovuli diversi e in possesso di genotipi differenti. In questo caso la differenza media tra i gemelli delle varie coppie è di circa 10, per cui sembra di poter attribuire un effetto marcato all'ereditarietà. Il confronto non può tuttavia discernere con esattezza tra l'incidenza dell'ereditarietà e quella dell'ambiente. I gemelli monozigotici, infatti, hanno ambiente molto simile, mentre i genotipi dei gemelli dizigotici sono in media meno diversi tra loro (per un fattore 2) che non quelli dei soggetti senza alcun nesso. Si sottovaluta quindi l'effetto dell'ereditarietà, ma si minimizza l'influenza ambientale.

non è necessariamente vero per un altro genotipo, e anche se fosse vero la misura del vantaggio potrebbe non essere la stessa. L'ideale sarebbe prevedere la reazione di tutti i genotipi in tutti gli ambienti. Ma la varietà dei genotipi è praticamente infinita, come la varietà degli ambienti. Perciò questo genere di previsioni è praticamente impossibile, tanto piú che rispetto all'uomo non abbiamo i mezzi per controllare i fattori ambientali che influiscono sul Q.I. E anche se fossero conosciuti tutti i fattori ambientali che influiscono in modo rilevante sullo sviluppo del comportamento, il controllo statistico con adeguate misure e la successiva analisi statistica dei dati farebbero sorgere ulteriori e gravissime difficoltà. Bisogna d'altra parte sottolineare il fatto che le quote di ereditarietà dipendono dal rapporto di forza fra fattori ambientali e fattori genetici esistente in quella popolazione al momento dell'analisi, e perciò non valgono per un'altra popolazione, e neppure per la popolazione cui si riferiscono una volta trascorso il momento storico in cui è stata compiuta l'analisi.

Quando si tratta di animali e di piante il controllo sperimentale delle condizioni ambientali è piú facile, ed è perciò possibile esplorare l'interazione genotipo-ambiente. Al riguardo, un interessante esperimento è stato realizzato da R. Cooper e da John P. Zubek, dell'Università di Manitoba, su due ceppi di ratti nei quali erano state accumulate, mediante un processo di selezione artificiale, differenze genetiche rispetto alla capacità di orientarsi in un labirinto. I due ceppi erano stati differenziati in modo che rispetto a questo compito gli individui di un gruppo erano « intelligenti » mentre gli individui dell'altro ceppo erano « stupidi ». Quando esemplari di questi due ceppi venivano allevati insieme, per una generazione in un ambiente « ristretto », cioè povero di stimoli, e diverso da quello di provenienza, non si osservava fra loro alcuna differenza. Gli esemplari di ambedue i ceppi, quelli « intelligenti » e quelli « stupidi », mostravano la stessa scarsa capacità di esecuzione. Quando invece l'allevamento misto di esemplari dei due ceppi avveniva in un ambiente ricco di stimoli, allora essi eseguivano ugualmente bene il loro compito (*si veda l'illustrazione a pag. 47*). Poiché la differenza fra i due ceppi è genetica, da questo esperimento si desume che l'effetto delle condizioni ambientali dovrebbe essere reversibile nelle generazioni successive. Data la struttura delle società umane questo esperimento è di rilevante importanza nell'esame delle differenze di Q.I. Se i bambini che crescono nei ghetti e i bambini che hanno genitori di elevata condizione socio-economica tendono ad avere indici di Q.I. rispettivamente inferiori e superiori a quelli che si potrebbero attendere se ambedue i gruppi fossero allevati nello stesso ambiente, allora i valori di ereditabilità possono essere sovrastimati.

La sola potenziale salvaguardia contro questi vizi di stima è lo studio dello stesso genotipo o di genotipi molto somiglianti in differenti ambienti. Nell'uomo uno studio di questo tipo può essere fatto solo attraverso l'osservazione dei bambini adottati. Di particolare interesse, in questo ambito di ricerche è lo studio di gemelli monovulari che siano stati separati al momento della nascita o subito dopo per essere allevati in famiglie differenti. In generale si rileva che la somiglianza tra gemelli che siano stati separati e allevati in ambienti diversi è di poco inferiore a quella dei gemelli cresciuti insieme. Sulla stessa linea di ragionamento la somiglianza tra genitori e figli adottivi può essere misurata e confrontata con quella tra genitori e figli « veri ». Al riguardo sono state compiute alcune ricerche, da cui risulta che l'ambiente familiare ha effettivamente un'influenza. sebbene non cosí marcata come quella dell'eredità biologica. Il coefficiente di correlazione fra genitori e figli adottivi è superiore a zero ma è indubbiamente inferiore a quello che si riscontra tra genitori e figli « veri ».

Un'analisi approfondita di questi dati è quasi impossibile perché l'ambiente varia da famiglia a famiglia, perché le interazioni genotipo-ambiente sono numerose e di vario genere, e perché infine fattori ambientali e fattori genetici si intrecciano in tanti modi cosí che è difficile stabilire, caso per caso, quale sia la loro importanza. L'adozione e l'allevamento in ambienti diversi di gemelli che siano stati separati fin dalla nascita avvengono in condizioni che son lungi dall'essere quelle ideali per un esperimento, e pertanto tutte le conclusioni restano solo semiquantitative. Sulla base dei dati di cui disponiamo, e tenuto conto di queste limitazioni, si può dire che l'ereditarietà dell'intelligenza, misurata in base al Q.I., è ancora abbastanza elevata. Tuttavia bisogna badare al fatto che in queste ricerche l'analisi dei fattori ambientali e delle loro conseguenze è generalmente limitata alle differenze tra famiglia e famiglia nonché tra membro e membro della stessa famiglia, nell'ambito di una frazione abbastanza omogenea della popolazione inglese o americana. Pertanto non si possono fare estrapolazioni per predire le conseguenze di differenze ambientali piú marcate o di diversa natura.

Tra le varie classi sociali vi sono rilevanti differenze per quanto riguarda il Q.I. Una delle ricerche piú ampie e apprezzate circa queste differenze e circa le ragioni della loro persistenza è quella pubblicata da Burt nel 1961, che ebbe per oggetto gli scolari di un tipico sobborgo londinese e i loro genitori (*si veda la figura nella pagina 39*). In base allo status lavorativo degli adulti i soggetti furono suddivisi, dal punto di vista socioeconomico, in sei classi. Si andava dalla classe 1, che comprendeva « professori universitari, professionisti di ugual rango del campo giuridico, medico, educazionale, ecclesiastico, l'alta borghesia commerciale e industriale, i funzionari di grado elevato della amministrazione pubblica, » fino alla classe 6, che comprendeva « lavoratori specializzati, lavoratori occasionali, e gli addetti ai lavori manuali piú grossolani ». I dati essenziali emersi dalla ricerca possono essere raggruppati nei seguenti quattro ordini:

1. Esiste una stretta correlazione tra il Q.I. medio dei genitori e la loro classe occupazionale. La differenza media fra classe superiore e classe inferiore è di oltre 50 punti. Il livello socioeconomico di una famiglia è generalmente determinato dallo status lavorativo del padre, ma il coefficiente di correlazione tra il Q.I. del padre e quello della moglie è piuttosto elevato, e contribuisce a differenziare le classi sociali l'una dall'altra rispetto al Q.I.

2. Malgrado il Q.I. medio dei genitori presenti una notevole variazione da classe a classe, la variazione residua del Q.I. tra genitori appartenenti alla medesima classe presenta anch'essa una notevole ampiezza. La deviazione standard media del Q.I. dei genitori in ognuna delle 6 classi è 8,6, cioè quasi tre quinti della deviazione standard per l'intero gruppo. Questa deviazione standard è di circa 15 punti e si osserva generalmente per quanto riguarda il Q.I. in ogni gruppo.

3. Il Q.I., medio della prole in ciascuna classe dista in misura quasi uguale dal Q.I. medio dei genitori e dal Q.I. medio della popolazione globale (quest'ultimo corrisponde a 100). Si tratta di un dato che era prevedibile e che conferma la correlazione tra il Q.I. dei genitori e quello dei figli, che, come abbiamo già visto, tende, in qualsiasi popolazione a essere pari a 0,5.

4. Un altro dato importante emerso dalla ricerca è che la deviazione standard del Q.I. della prole, che in media è di 13,2, ha quasi lo stesso valore della deviazione standard della popolazione globale, cioè 15. Questo è un altro segno del fatto che nell'ambito di ciascuna classe sociale esiste un'ampia variabilità del Q.I.

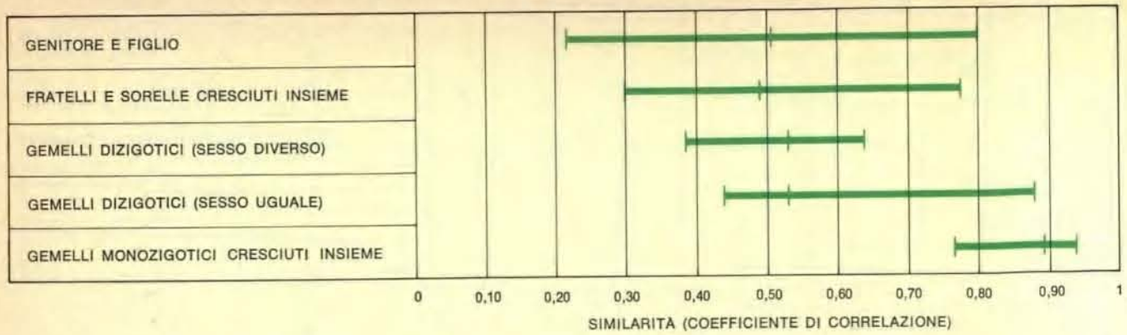
Da tutti questi dati sembra risultare che il Q.I. è il principale dei fattori che determinano la classe occupazionale in cui un individuo si colloca, e che d'altronde tale quoziente ha uno spiccato carattere di ereditarietà (sebbene non sia possibile distinguere l'eredità biologica dall'eredità culturale). Tenendo conto del fatto che tra i giovani di ogni classe socio-economica il Q.I. presenta ampie variazioni e che esso tende a spostarsi verso il Q.I. medio della popolazione globale, Burt ha notato che le differenze di Q.I. tra classe e classe possono persistere solo a condizione che ogni generazione sia caratterizzata da un intenso processo di mobilità sociale. Secondo le sue stime affinché la distribuzione delle differenze di Q.I. tra le varie classi possa permanere, bisognerebbe che a ogni generazione almeno il 22 per cento della popolazione potesse cambiare classe fondamentalmente a causa del Q.I. Questa percentuale è inferiore a quelle riguardanti la mobilità sociale intergenerazionale in Inghilterra, che risulta pari a circa il 30 per cento.

L'esistenza nell'ambito di una popolazione umana di sottogruppi in condizioni di isolamento riproduttivo per ragioni culturali, e spesso anche razziali, provoca quasi inevitabilmente l'insorgenza di tensioni sociali che sono i semi del razzismo. Questa è una verità generale che vale per tutta la storia del genere umano, e non è dunque riferibile solo alle odierne tensioni fra i gruppi razziali, del genere di quelle che esistono fra bianchi e negri degli Stati Uniti. I conflitti fra gruppi religiosi, per esempio il conflitto tra protestanti e cattolici dell'Irlanda del nord, sono un altro caso di tensioni sociali dello stesso tipo. La divergenza culturale spesso s'accompagna a una condizione economica di inferiorità dell'uno o dell'altro gruppo, e ciò inasprisce le tensioni.

Alle forti differenze culturali fra bianchi e negri s'aggiungono forti differenze somatiche che contribuiscono potentemente al conflitto razziale. Se le differenze culturali fra protestanti e cattolici venissero meno non vi sarebbe alcun modo di distinguere un gruppo dall'altro. Non si può dire la medesima cosa a proposito delle tensioni fra bianchi e negri degli Stati Uniti. La differenza di colore della pelle potrebbe diminuire solo se per molte generazioni i matrimoni avvenissero completamente a caso.

Questi matrimoni avvengono di rado negli Stati Uniti. La frequenza media dei matrimoni tra bianchi e negri corrisponde ancora al 2 per cento circa di quella che ci si potrebbe attendere se i matrimoni si verificassero a caso, cioè senza riguardo alle differenze di razza. Questo dato riflette la persistenza di un altro grado di isolamento riproduttivo dei gruppi razziali, malgrado il movimento sviluppatosi in anni recenti per sollecitare un energico intervento legislativo in favore della desegregazione. In fatto di separazione razziale le Hawaii costituiscono un'eccezione degna di rilievo, ma anche qui la frequenza dei matrimoni misti è solo del 40 o 50 per cento di quella che si registrerebbe se i matrimoni capitassero a caso.

L'inferiorità socioeconomica di un gruppo rispetto all'altro suscita inevitabilmente la domanda se essa dipenda o no prevalentemente da fattori genetici. Di recente si è cercato di rispondere a questa domanda, riguardo ai bianchi e ai negri degli Stati Uniti, prendendo in esame le differenze medie tra i due gruppi rispetto al Q.I. Molte ricerche hanno dimostrato che tra i due gruppi esistono effettivamente forti differenze nella distribuzione del Q.I. Depongono, per esempio, in questo senso i dati ottenuti da Wallace A. Kennedy e dai suoi collaboratori dell'Università Statale della Florida, in una ricerca estensiva, pubblicata nel 1961, che fu eseguita mediante la somministrazione di reattivi mentali a 1800 bambini negri nelle scuole elementari di cinque stati del sud (Florida, Georgia, Alabama, Tennessee, Carolina del sud). Se si confronta la distribuzione messa in evidenza da questi ricercatori con quella rilevata in un campione di 190 bambini appartenenti alla popolazione bianca degli Stati Uniti, si rilevano forti dif-



I coefficienti di correlazione servono a determinare, per esempio, la somiglianza tra i Q.I. di due serie di congiunti, per esempio genitori da un lato e figli dall'altro. Il coefficiente 1 significa identità; lo zero indica l'indipendenza reciproca delle variabili. Questi dati sono stati tratti dalla letteratura da L. Erlenmeyer-Kimling e Lissy F. Jarvik dell'Istituto psichiatrico dello Stato di New York allo scopo di ottenere la misura dell'incidenza relativa dell'ereditarietà e dell'ambiente, tenendo conto di tutti i possibili effetti dei legami di parentela tra i soggetti in esame. Il segmento in alto indica che per campioni di genitori e figli attinenti a indagini diverse i coefficienti vanno da circa 0,20 a circa 0,80. Il secondo segmento indica che i coefficienti per fratelli e/o sorelle allevati insieme vanno da 0,30 a circa 0,78. Il campo di correlazione per gemelli dizigotici di sesso opposto va da 0,38 a 0,65; per gemelli dizigotici del medesimo sesso va da 0,43 a 0,88. La media (*trattino verticale sui segmenti*) per ciascuna serie di parentela è di circa 0,50. Per i gemelli monozigotici (identici), però, si ha un campo di correlazione tra 0,77 e 0,92 con media 0,89. Il coefficiente medio 0,50 è quello che si dovrebbe avere in assenza completa degli effetti ambientali sul Q.I. Ma proprio a causa dell'incidenza dell'ambiente questi calcoli avrebbero bisogno di ulteriore approfondimento.

ferenze. La differenza media di Q.I. tra bianchi e negri era di 21,1 punti, mentre la deviazione standard della distribuzione tra negri era inferiore di circa il 25 per cento a quella rilevata fra i bianchi (12,4 contro 16,4). Come c'era da attendersi, le due curve di distribuzione tendono a sovrapporsi, perché la variabilità del Q.I. come la variabilità di altre caratteristiche, è, nell'ambito di una qualsiasi popolazione, piú grande di quella che si riscontra fra due popolazioni qualsiasi. Nondimeno il 95,5 per cento dei negri ha un Q.I. inferiore a 101,8, che è il valore medio dei bianchi, e il 18 per cento inferiore a 70. Solo nel 2 per cento dei bianchi il Q.I. scende al di sotto di questo valore.

Poiché le differenze tra media del Q.I. nei bianchi e media del Q.I. nei negri segnalate da altri ricercatori sono generalmente comprese fra 10 e 20 punti, il valore trovato da Kennedy e dai suoi collaboratori è uno dei piú pronunciati. Negli stati del nord la differenza tra bianchi e negri è minore che negli stati del sud, e ciò è in evidente rapporto con le particolari condizioni delle popolazioni esaminate. Un noto studio sui risultati del reattivo Alfa, usato nell'esercito degli Stati Uniti, ha dimostrato che negri di alcuni stati del nord avevano indici di intelligenza superiori a quelli di bianchi degli stati del sud, sebbene i bianchi risultassero costantemente superiori ai negri del medesimo stato. Vi sono indubbiamente molte variabili che influenzano il Q.I., ma le differenze medie riscontrate fra bianchi e negri negli Stati Uniti sono confermate da molte ricerche e risultano piuttosto marcate.

Le differenze correlate con la classe sociale si distinguono da quelle correlate con le differenze razziali riscontrate tra bianchi e negri in base a due principali caratteristiche. La prima di queste caratteristiche è data dal fatto che i fattori ambientali sono piú rilevanti nella determinazione delle differenze correlate alla razza che non nella determinazione delle differenze correlate alla classe sociale. Infatti non si può assumere che la variazione di tali fattori nell'ambito di una popolazione inglese relativamente omogenea abbia una ampiezza tale che le differenze derivanti da essa siano paragonabili alle differenze ambientali medie che si riscontrano tra bianchi e negri degli Stati Uniti. Il secondo fattore di distinzione, ancor piú importante, è che le differenze di Q.I. tra classe e classe si mantengono nel tempo a causa della mobilità occupazionale, dovuta soprattutto al Q.I., per cui sono i soggetti intellettualmente piú dotati che di norma entrano nelle classi occupazionali piú elevate. La mobilità professionale non ha corrispettivo quando in luogo delle differenze correlate alla classe si considerano le differenze correlate alla razza: il colore della pelle impedisce la mobilità da una razza all'altra.

Le argomentazioni che sostengono la natura prevalentemente genetica delle differenze di Q.I. tra razza e razza si basano sul presupposto che le attuali stime circa l'ereditarietà del Q.I., benché rimandino esclusivamente a osservazioni effettuate nell'ambito della razza bianca, siano valide anche per la misurazione delle differenze razziali d'ordine genetico. Noi abbiamo sottolineato il fatto che le stime di ereditarietà hanno valore solo per la popolazione studiata, e in riferimento all'ambiente a essa peculiare. L'estrapolazione delle attuali stime di ereditarietà alle differenze razziali si fondano sul presupposto che le differenze ambientali fra razza e razza siano comparabili alle variazioni d'ordine ambientale che si rilevano nell'ambito di ciascuna razza. Poiché questo presupposto è arbitrario, bisogna concludere che dalle stime di ereditarietà compiute nell'ambito delle singole razze non si possono derivare indicazioni di sorta circa le differenze genetiche tra razza e razza. Il fatto che la variazione del Q.I. nell'ambito di una razza sia interamente determinato da fattori genetici o interamente determinato da fattori ambientali non ha niente a che fare con la domanda relativa alla misura in cui i fattori ambientali e i fattori genetici rispettivamente influiscono sulla determinazione delle differenze tra razza e razza.

Una delle principali prove fornite da Jensen per dimostrare che le differenze di Q.I. hanno una cospicua componente genetica è data dal fatto che esse sussistono anche quando si mettono a confronto bianchi e negri appartenenti al medesimo status socioeconomico. Poiché tale status è definito in termini di scolarità, occupazione e reddito, esso può consentire una misura delle variazioni ambientali o almeno di quelle che risultano correlate alle differenze di classe che abbiamo esaminato in precedenza.

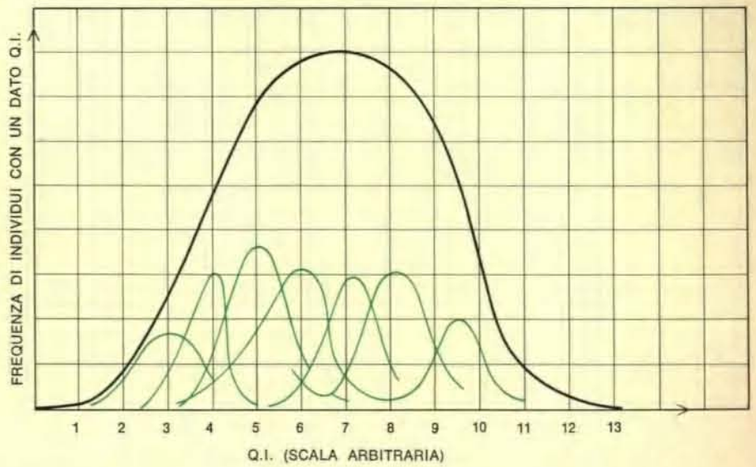
Se si assume che lo status socioeconomico è veramente una misura dello ambiente totale – i dati che si ottengono da questo confronto potrebbero effettivamente dimostrare che le differenze di Q.I. hanno una determinazione genetica. Tuttavia è difficile stabilire fino a che punto sia legittimo confrontare lo status dei negri con lo status dei bianchi. La reale esistenza di una stratificazione razziale collegata con la stratificazione socioeconomica rende sospetto un confronto del genere. Tutti sanno che nelle scuole per ragazzi negri il livello delle prestazioni didattiche generalmente è inferiore a quello delle scuole per bianchi, sicché il medesimo numero di anni di scuola non garantisce il medesimo grado di preparazione. D'altra parte nella medesima classe occupazionale c'è ampia variazione del livello di occupazione e si potrebbe dimostrare che anche nell'ambito della stessa classe occupazionale i negri sono situati a livelli inferiori a quelli dei bianchi. Non v'è ricchezza che possa far entrare un negro nella *upper-class* di una comunità bianca, o annientare tutti i pregiudizi razziali che per piú di duecento anni si sono accumulati nei bianchi, o ricostituire la famiglia negra, sgretolata anche a causa di fattori culturali che vengono trasmessi di generazione in generazione sin dai tempi della schiavitú. È impossibile accettare l'idea che le misurazioni relative allo status socioeconomico possono fornirci un'adeguata verifica circa le piú importanti differenze ambientali tra bianchi e negri.

Jensen ha avanzato altre prove in favore della tesi che le differenze medie tra bianchi e negri in ordine al Q.I. sono interamente o quasi di natura genetica, e ha sfidato i lettori di un suo articolo sulla « Harvard Educational Review » a verificarle. Una di queste prove è costituita da una serie di dati da cui risulta che anche fra i negri è presente il fenomeno da noi già segnalato a proposito di alcune ricerche su soggetti di razza bianca: il fatto, cioè, che il Q.I. della prole sia in rapporto con la classe sociale cui i genitori appartengono, e che esso tende d'altronde a spostarsi verso i valori medi. La sola conclusione che si può trarre da questi dati è che nei negri l'ereditabilità del Q.I. è piuttosto marcata. Ma nulla ci dicono sulle differenze tra bianchi e negri che piú influenzano il Q.I., e qui sta il vero problema.

Jensen ha esaminato anche le differenze razziali relative sia agli indici di sviluppo della motricità durante i primi mesi di vita, sia agli indici di sviluppo di altre funzioni che si ritengono correlate al Q.I. Il presupposto di tali indagini è che l'incremento di questi indici di sviluppo sia determinato da fattori genetici. In realtà le influenze ambientali sullo sviluppo sono state oggetto di ampie ricerche, ma le informazioni in merito non ci aiutano a risolvere i problemi riguardanti l'ereditarietà del Q.I. Jensen, inoltre, basandosi sul noto rapporto Coleman, afferma che gli indiani americani, per quanto riguarda il Q.I., nonostante il basso grado di scolarità si discostano meno dei negri dai soggetti di razza bianca. Bisogna tuttavia osservare che secondo il rapporto Coleman gli indiani americani frequentano generalmente scuole in cui i bianchi costituiscono la maggioranza, ciò che di solito non si verifica nella maggior parte delle scuole frequentate da negri. (Del resto è possibile che la differenza tra bianchi e indiani americani sia in realtà maggiore di quella segnalata dal rapporto Coleman, dal momento che il campione di indiani preso in esame forse non è veramente rappresentativo del 70-80 per cento della popolazione indiana che vive nelle riserve). La verità è che le differenze fra indiani americani e bianchi, o fra indiani e negri, non sono piú facili da determinarsi di quanto lo siano quelle fra bianchi e negri.

Jensen afferma che sono note tante differenze fra il corredo genetico dei negri e quello dei bianchi, e che « differenze genetiche emergono da tutti i confronti – anatomici, fisiologici, biochimici – operati fra campioni rappresentativi di ben definiti gruppi razziali... non vi è alcuna ragione per supporre che il cervello e l'intelligenza costituiscono un'eccezione a questa regola generale ». Come genetisti noi possiamo affermare con certezza che non vi è alcuna ragione a priori per cui i geni che aumentano il Q.I. siano, in media, piú numerosi nei bianchi che nei negri, tanto piú che nel corredo genetico delle due razze la frequenza dei geni che influenzano il Q.I. non è la medesima. Al contrario, assumendo che i geni che influenzano positivamente il Q.I. non hanno alcuna tendenza ad accumularsi per selezione nell'una o nell'altra razza, si può supporre che quanto piú sono numerosi i geni polimorfi che influenzano il Q.I., e la cui frequenza varia dai negri ai bianchi, tanto meno è probabile che vi sia tra le due razze una differenza media di Q.I. dovuta a fattori genetici. Lo stesso discorso vale a proposito delle differenze tra due razze qualsiasi.

Poiché la selezione naturale è il principale fattore di cambiamento genetico, ci si può chiedere se essa abbia determinato una differenza tra bianchi e negri degli Stati Uniti. Ricorrendo al modello genetico elementare di cui ci si vale nella selezione di piante e animali per prevedere i risultati del processo selettivo si può azzardare una risposta approssimativa circa la « quantità » di selezione che può essere stata necessaria per dare origine a una differenza di 15 punti, quanto ne corre fra



L'ereditabilità è la misura degli effetti relativi dell'ereditarietà e dell'ambiente su certe variabili quali il Q.I. La stima dell'ereditabilità si basa sull'ipotesi che una data popolazione sia composta da vari gruppi, ciascuno contraddistinto da un suo genotipo e da una sua distribuzione di Q.I. (*curve in colore*). Il totale di queste distribuzioni di Q.I. individua la distribuzione del Q.I. per la popolazione (*curva nera*). Poiché i componenti di ogni gruppo hanno il medesimo genotipo, tutte le variazioni all'interno dei gruppi sono di carattere ambientale. L'incidenza dell'ereditarietà sulla distribuzione di Q.I. totale si può calcolare facendo la media complessiva delle distribuzioni dei vari gruppi e sottraendola dalla distribuzione di Q.I. totale. Il resto che si ottiene rappresenta la variazione totale dovuta a fattori puramente genetici.

il Q.I. dei bianchi e quello dei negri. Il calcolo si basa su tre presupposti. Il primo presupposto è che all'inizio non vi fosse alcuna differenza fra i soggetti di razza bianca e quelli di razza caucasica. Il secondo presupposto è che il Q.I. abbia una ereditarietà in senso stretto pari al 50 per cento. Il terzo, infine, è che i negri americani abbiano cominciato a differenziarsi dagli africani circa duecento anni fa, cioè da sette generazioni, il che comporta una diminuzione di circa due punti a ogni generazione. Se ora ci rifacciamo al modello genetico cui si è fatto cenno, questo indice di mutamento può essersi realizzato solo a condizione che a ogni generazione il 15 per cento dei soggetti intellettualmente piú dotati sia stato escluso dal processo riproduttivo. In realtà non è possibile dimostrare che durante la schiavitú la selezione abbia inciso cosí negativamente per il Q.I.

A nostro avviso nessuna delle prove surriferite conferma le conclusioni di Jensen. La tesi secondo cui le differenze di Q.I. tra bianchi e negri degli Stati Uniti sono dovute a fattori genetici potrebbe essere dimostrata solo mediante un confronto tra un campione rappresentativo di bambini negri e un campione altrettanto rappresentativo di bambini bianchi, allevati in ambienti che possono a loro volta essere messi in reciproco confronto. Ma per ora un esperimento del genere appare irrealizzabile.

Che cosa si può dire circa le differenze ambientali di cui si conosce o si sospetta un'influenza sul Q.I. In primo luogo bisogna notare che malgrado la stima di ereditarietà del Q.I. sia di solito piuttosto elevata, Orazio H. Newman e i suoi collaboratori dell'Università di Chicago hanno riscontrato che le differenze tra gemelli monovulari allevati separatamente varia da 1 a 24 punti, ed è in media pari a 8 punti. Da ciò si può desumere che anche nell'ambito della popolazione bianca vi è un'ampia variazione del Q.I. dovuta a fattori ambientali.

In ordine all'importanza di particolari influenze ambientali meritano di essere sottolineate le seguenti osservazioni:

1. Tra gemelli, da un lato, e non-gemelli, dall'altro, si rileva sistematicamente una differenza di oltre cinque punti, del tutto indipendente dalle condizioni socioeconomiche della famiglia di appartenenza e da altre variabili note. Questa inferiorità del Q.I. dei gemelli può essere dovuta sia al fatto che in caso di gravidanza gemellare l'ambiente uterino è meno favorevole allo sviluppo del prodotto del concepimento, sia al fatto che i genitori, per la contemporaneità delle nascite, non sono in grado di prestare ai gemelli tutte le cure che si richiedono nella prima infanzia.

2. È stato segnalato che soggetti negri esaminati da persone della loro razza ottenevano un punteggio di due o tre punti superiore a quello che conseguivano quando gli esaminatori erano bianchi.

3. Alcune ricerche eseguite da Stephen Zamenhof e dai suoi collaboratori della scuola di medicina dell'Università di California, hanno dimostrato che somministrando a ratti femmina prima e durante la gravidanza una dieta povera di proteine si provoca una cospicua diminuzione del contenuto di DNA nel cervello della prole, e cioè, presumibilmente, una diminuzione numerica delle cellule cerebrali. La diminuzione del DNA e dei neuroni cerebrali risulta correlata a disturbi di comportamento. In base a queste ricerche si può pertanto avanzare l'ipotesi che nell'uomo le differenze di Q.I. possano anche essere determinate dieteticamente, attraverso meccanismi simili a quelli evidenziati dall'esperimento. Non vi è dubbio infatti che in molte zone la povertà dei negri comporti carenze alimentari che possono danneggiare lo sviluppo cerebrale del prodotto del concepimento. Analoghe conseguenze potrebbero avere le carenze alimentari sofferte nella prima infanzia.

4. Da molto tempo si è consapevoli dell'importanza che ha l'ambiente familiare per lo sviluppo intellettuale del bambino. Possediamo dati estremamente dimostrativi circa le dannose conseguenze che hanno le gravi privazioni sensorie nella prima infanzia. Vi sono pochi dubbi sul fatto che, in generale, l'ambiente familiare per i negri degli Stati Uniti è meno soddisfacente che per i bianchi, a causa sia dell'inferiorità del loro status socioeconomico, sia di fattori culturali che operano sin dai tempi della schiavitú. È probabile che questo particolare fattore ambientale abbia un'influenza predominante sul Q.I. fino al termine degli anni prescolari. Anche in questo caso gli esperimenti sugli animali confermano l'importanza che le esperienze vissute nei primi periodi della vita hanno per lo sviluppo cerebrale.

5. La previsione dell'insuccesso in genere porta l'insuccesso.

Nel suo articolo sulla « Harvard Educational Review » Jensen preferisce minimizzare la portata di fattori ambientali di questo tipo. Noi crediamo tuttavia che non vi siano prove contro l'idea che essi, assieme ad altri fattori ambientali, molti dei quali indubbiamente sono ancora da scoprire, potrebbero renderci conto di tutte le differenze di Q.I. tra negri e bianchi.

Noi non abbiamo alcuno strumento per escludere che le differenze medie di Q.I. tra razza e razza siano in parte determinate per via genetica. Noi sosteniamo semplicemente che i dati attualmente disponibili non sono sufficienti per risolvere la questione nell'uno o nell'altro senso. Il solo modo per stabilire se vi sono differenze di Q.I. dovute a fattori razziali è quello di esaminare comparativamente bambini negri adottati in famiglie bianche e bambini bianchi adottati in famiglie negre. Perché il ricercatore abbia la sicurezza di prendere in considerazione tutte le influenze dell'ambiente familiare subite dai soggetti in esame, anche quelle che agiscono nei primissimi tempi di vita, i bambini dovrebbero essere adottati fin dalla nascita. Si potrebbe altresí confrontare il Q.I. di bambini negri adottati in famiglie bianche con il Q.I. di bambini bianchi adottati in famiglie anch'esse bianche e confrontabili a loro volta con quelle del primo gruppo dal punto di vista delle caratteristiche ambientali.

Per quanto sappiamo ricerche di questo genere, rigorosamente scientifiche, non sono mai state compiute. Del resto c'è da chiedersi se nelle attuali circostanze ricerche del genere potrebbero davvero essere effettuate con sufficienti garanzie di controllo sperimentale, dal momento che non si potrebbero rimuovere i pregiudizi che in molte comunità bianche si nutrono contro le persone di razza negra. Noi pertanto sosteniamo che sarà impossibile trovare una risposta soddisfacente agli interrogativi in merito alla natura genetica delle differenze razziali del Q.I. fino a quando le differenze ambientali tra bianchi e negri degli Stati Uniti non saranno sostanzialmente ridotte.

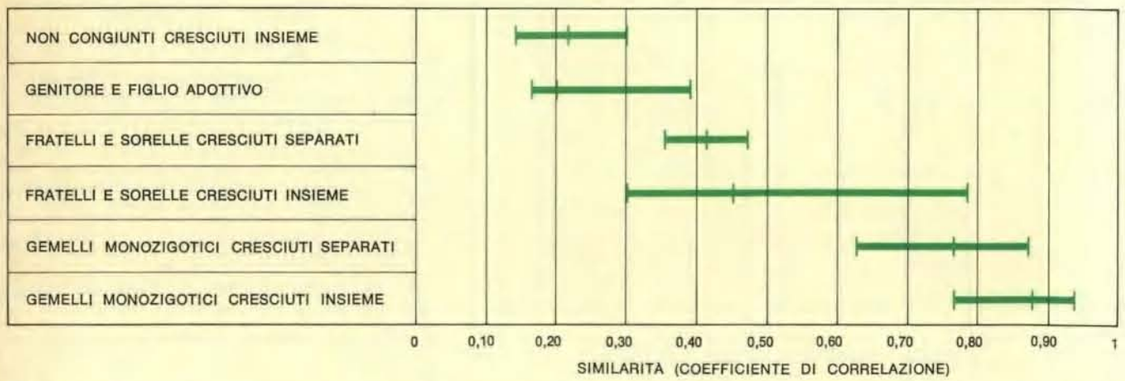
Prescindendo dalle difficoltà intrinseche del problema, non sembra, d'altronde, che vi siano valide ragioni, né sul versante teorico né su quello pratico, per vedere di buon occhio l'appoggio che viene fornito alle ricerche in questo campo. Da un punto di vista teorico è improbabile che queste ricerche riusciranno a gettare molta luce sul problema generale del controllo genetico del Q.I., considerato che probabilmente solo una piccola parte della variazione totale del Q.I. è dovuta a differenze razziali. Il semplice fatto che i dati relativi a tali differenze non siano stati utili alle ricerche relativamente grossolane compiute finora sulla ereditarietà del Q.I. fa pensare che esse non siano le differenze piú significative per la ricerca. Per raggiungere una migliore conoscenza circa l'ereditarietà del Q.I. occorrono molti lavori preliminari sulla biochimica e la biologia dello sviluppo mentale, da eseguirsi in condizioni controllate, appoggiandosi altresí alle differenze genetiche conosciute.

Il solo argomento valido in favore di ricerche sulle differenze di Q.I. correlate alla razza è forse il seguente: dal momento che si è posta la questione sulla natura genetica di tali differenze, un tentativo per rispondervi deve essere pur fatto. In assenza di queste ricerche coloro che ora pensano – a nostro avviso sulla base di prove inadeguate – che le differenze di Q.I. tra bianchi e negri degli Stati Uniti siano genetiche, resteranno liberi di continuare la loro campagna in favore di un assetto del nostro sistema educazionale ed economico ispirato al principio che rispetto al Q.I. esistono differenze razziali innate.

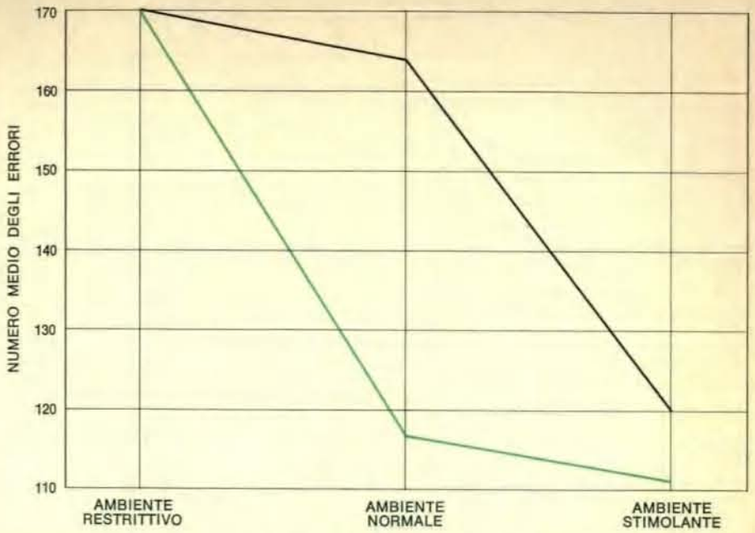
Campagne del genere si potrebbero arginare dimostrando che le differenze non hanno una base genetica. D'altra parte, anche se questa dimostrazione non fosse possibile e anzi si conseguisse la prova che le differenze in questione hanno effettivamente un carattere genetico, queste ricerche non dovrebbero avere conseguenze negative in una società autenticamente democratica e libera da pregiudizi razziali. La nostra società proclama che non vi devono essere discriminazioni contro un individuo sulla base della razza, della religione e di altre categorie precostituite compreso il sesso.

Tutti gli individui devono avere uguali opportunità, nella piú ampia misura possibile, secondo le proprie necessità, perché ognuno possa realizzare pienamente le sue potenzialità. Senza dubbio un sistema educativo progredito deve tenere in debito conto le differenze innate individuate e valutate in riferimento ai singoli individui, non alle razze. Su questo punto qualsiasi affermazione contraria dimostra che si è incapaci di distinguere le differenze tra individui dalle differenze tra popolazioni.

Attualmente, per il clima razziale che regna negli Stati Uniti, le ricerche sulle differenze razziali del Q.I., anche se perseguono fini apprezzabili, possono essere interpretate capziosamente, rischiano di diventare uno strumento del razzismo, e possono in definitiva portare a un inasprimento delle tensioni razziali.



L'incidenza dell'ambiente si può misurare mediante il confronto tra i coefficienti di correlazione per individui con i medesimi precedenti genetici, ma allevati in ambienti diversi, rispetto agli individui con storia genetica diversa, ma cresciuti nello stesso ambiente. I dati raccolti rivelano come persone senza legami di parentela allevate insieme abbiano coefficienti che vanno da 0,15 a poco piú di 0,30. Il campo di correlazione per genitori e figli adottivi va da 0,16 a quasi 0,40. Per fratelli e/o sorelle cresciuti separatamente i coefficienti si collocano tra piú di 0,30 a piú di 0,40. I coefficienti per fratelli e/o sorelle allevati insieme vanno da 0,30 a poco meno di 0,80. Nel caso di gemelli monozigotici allevati separatamente si hanno coefficienti tra piú di 0,60 e piú di 0,80, mentre nel caso di monozigotici cresciuti insieme i coefficienti oscillano tra piú di 0,70 e piú di 0,90. Sembrerebbe quindi che l'incidenza dell'ambiente sull'intelligenza non sia tanto forte quanto quella dell'ereditarietà.



L'interazione genotipo-ambiente scaturisce dai risultati di questo esperimento, condotto da R. Cooper e John P. Zubek dell'Università di Manitoba. La sperimentazione riguardava due gruppi di ratti, quelli addestrati a essere « intelligenti, » ossia bravi nel trovar la strada in un labirinto, e quelli addestrati alla « stupidità. » In ambiente normale i ratti intelligenti (*curva colorata*) commisero solo 120 errori, mentre quelli stupidi (*curva in nero*) fecero registrare circa 168 errori. Tuttavia entrambi i gruppi, se allevati in ambiente restrittivo, registravano circa 170 errori. In ambiente stimolante il comportamento dei due gruppi risultò soddisfacente in modo indifferenziato.

I grandi albatros

L'albatros reale e l'albatros urlatore sono gli uccelli che possiedono la maggiore apertura alare. Le due specie sono cosí simili, che si possono considerare evolute, in tempi non troppo lontani, da un antenato comune

di W. L. N. Tickell

Due specie affini della famiglia dei Diomedeidi, e cioè l'albatros reale e l'albatros urlatore, sono i piú grandi uccelli oceanici e sono anche quelli che possiedono, tra i volatili, la maggiore apertura alare, che è superiore ai 3,3 m. L'unico uccello di dimensioni paragonabili a queste è il condor delle Ande, che può avere un peso maggiore, ma ha un'apertura alare di 3 m. Gli albatros reale e urlatore sono due specie distinte della stessa famiglia, che comprende 13 specie (11 appartenenti al genere *Diomedea* e due al genere *Phoebetria*), ma talvolta vengono designati col nome di « grandi albatros ». Tutti questi uccelli appartengono all'ordine dei Procellariformi, gruppo che comprende anche le ossifraghe, le procellarie, le berte e altri uccelli, tutti perfettamente adattati a un ambiente marino.

Nei secoli XVIII e XIX la differenza tra i due grandi albatros non era ancora stata chiarita: solo nel 1891 l'ornitologo inglese Walter L. Buller riuscí a dimostrare l'esistenza di due specie distinte. Entrambi gli uccelli sono bianchi, con la punta delle ali nera; l'albatros reale, *Diomedea epomophora*, ha le narici arrotondate, e le palpebre e i bordi taglienti della mascella superiore neri; l'albatros urlatore, *D. exulans*, ha le narici meno arrotondate, e ha bianchi sia le palpebre sia i bordi taglienti del becco. Queste differenze sono talmente insignificanti che è difficile notarle vedendo gli albatros volare sul mare. Un'altra possibilità d'identificazione è quella di osservare le differenze nello sviluppo del piumaggio. I giovani albatros reali si ricoprono di penne dello stesso colore di quello dei genitori, mentre i giovani albatros urlatori sono scuri quando lasciano il nido e diventano lentamente piú chiari e poi, dopo parecchi anni, completamente bianchi. Gli albatros urlatori quindi si identificano facilmente nei primi periodi di vita per il piumaggio piú scuro; tuttavia quasi metà dei maschi e circa un quinto delle femmine, nel periodo della riproduzione, raggiungono abbastanza rapidamente un colore bianco.

Gli studi sull'albatros reale sono stati eseguiti quasi esclusivamente da biologi neozelandesi. Tra il 1938 e il 1952 L.E. Richdale dell'Università di Otago studiò una popolazione di albatros reali al Capo Taiaroa sulla Penisola di Otago, nell'isola meridionale della Nuova Zelanda, mentre tra il 1942 e il 1958 J.H. Sorensen, membro della spedizione neozelandese durata dal 1941 al 1945 e K.E. Westerskov, dell'Università di Otago, osservarono una popolazione di albatros reali molto più numerosa, sull'Isola Campbell, solitario avamposto tra la Nuova Zelanda e il Mare di Ross.

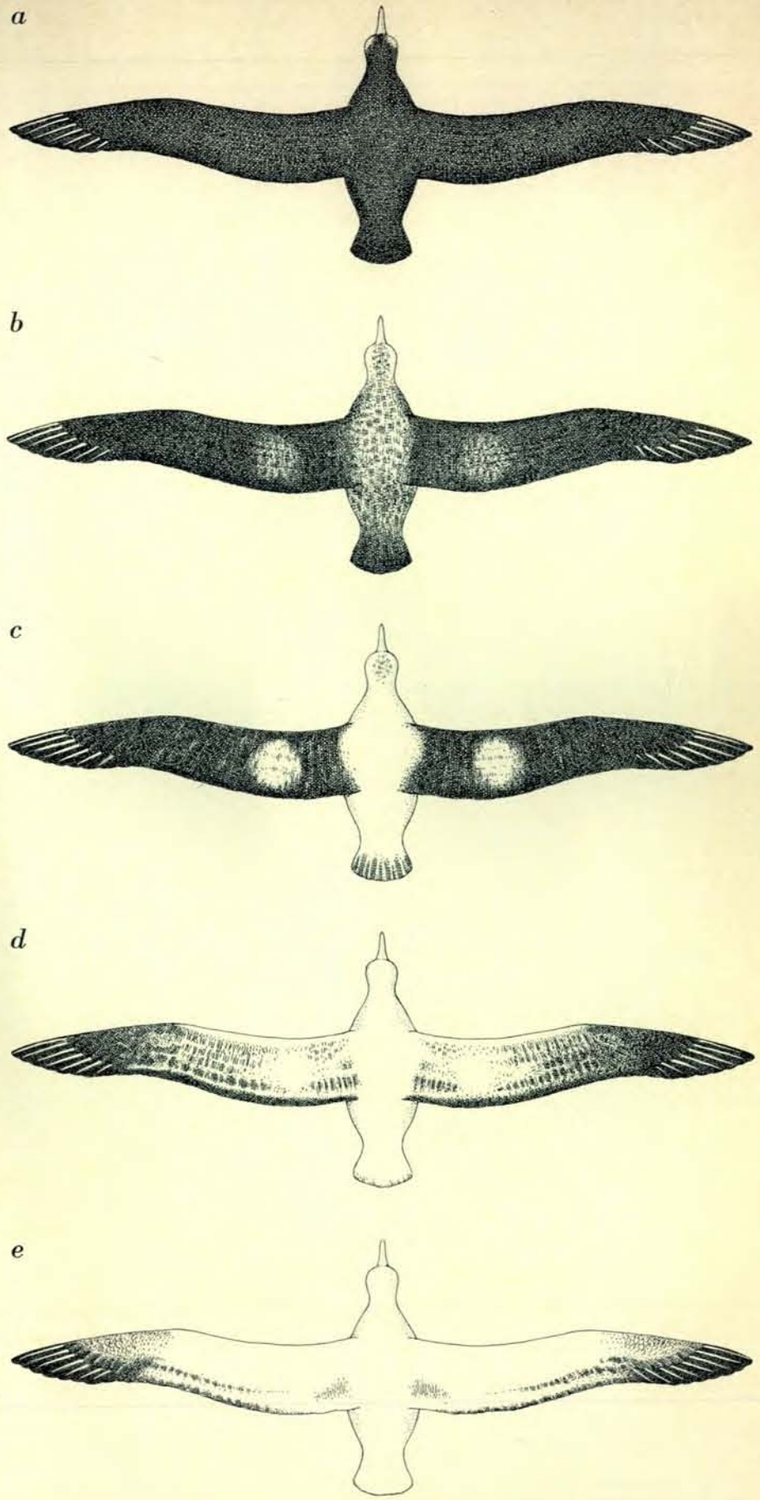
La storia del lavoro di Richdale dimostra come i grandi albatros siano tenaci nel nidificare nel medesimo luogo. Nel 1920 si osservò che un paio di albatros reali aveva nidificato a Capo Taiaroa: gente del luogo rubò, purtroppo l'unico uovo dal nido. La stessa coppia, probabilmente, depose poi un uovo all'anno per 15 anni: solo una volta il nido fu lasciato intatto, abbastanza a lungo da lasciar nascere un piccolo, che però, poi, fu ucciso. Finalmente, nel 1938, per gli sforzi di Richdale e la protezione della Royal Society della Nuova Zelanda, si poté allevare con successo un giovane albatros e Richdale poté studiare gli uccelli nei successivi 15 anni. Grazie alle strette misure imposte dal Ministero degli affari interni e dalla capitaneria del porto di Otago, negli ultimi 31 anni la colonia si è accresciuta: ora vi nidificano 15 coppie.

È probabile che gli albatros reali si siano moltiplicati nella Nuova Zelanda prima che l'area fosse popolata dai Maori immigrati nel XIV secolo; si pensa che i Maori siano responsabili dell'estinzione di un altro famoso uccello: il gigantesco moa, incapace di volare. Si potrebbe pensare che anche l'albatros avesse carni commestibili e fosse facile da catturare sulla terraferma; ma non vi sono prove sufficienti per dimostrare questa ipotesi; il recente sviluppo della popolazione di albatros al Capo Taiaroa è forse dovuto al caso. Benché la colonia di Otago sia assai piccola in confronto a quelle di albatros reali sull'Isola Campbell, sulle Isole Chatham e sulle Isole Auckland, tuttavia Capo Taiaroa è l'unica località del mondo dove un grande albatros nidifichi in una zona abitata dall'uomo: la città di Dunedin dista solo 30 km.

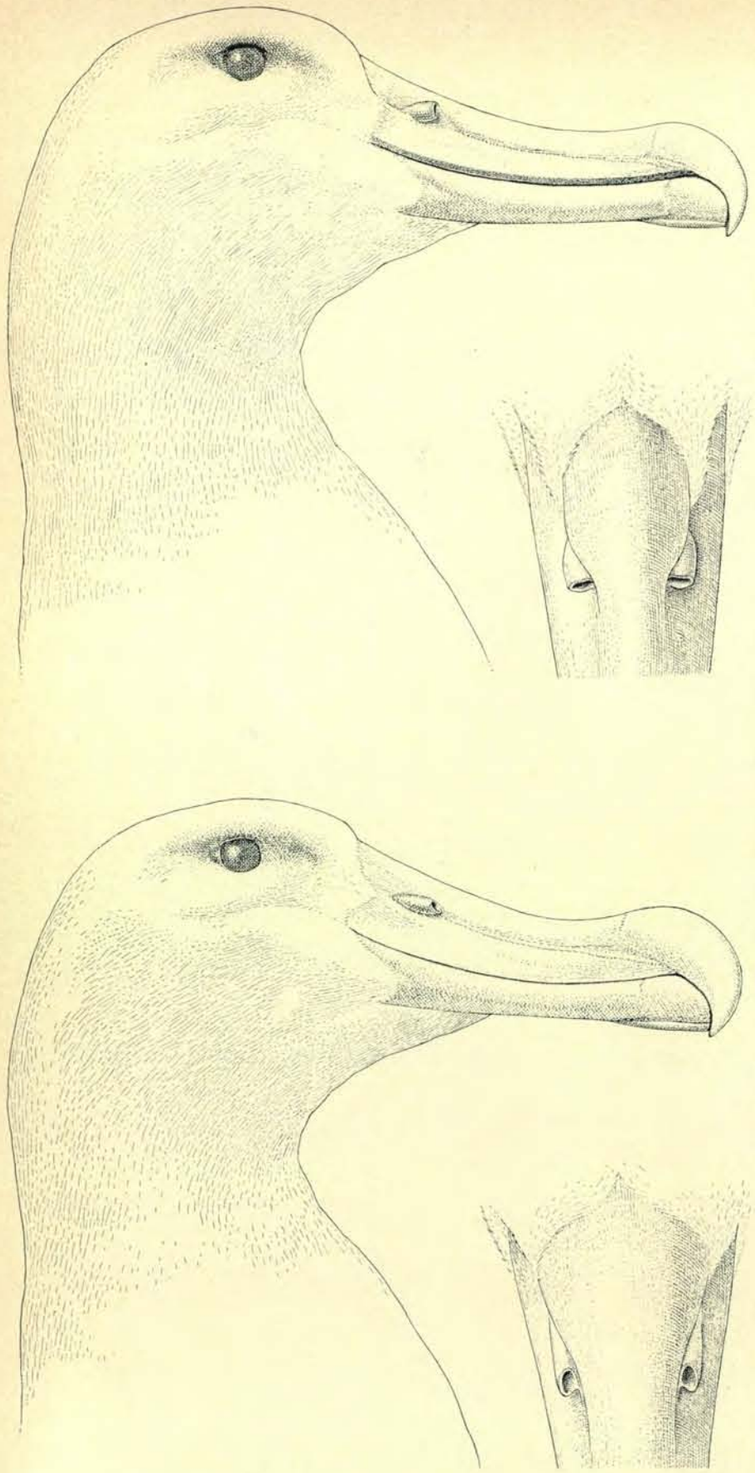
Mi sono occupato particolarmente dell'albatros urlatore: dopo una spedizione informativa sull'area di nidificazione subartica di questo albatros nella Georgia del Sud, la Johns Hopkins University finanziò uno studio permanente su quella popolazione di albatros. Nei periodi 1960-61, e 1962-64 la National Science Foundation finanziò una serie di tre spedizioni, per le quali il British Antarctic Survey forní l'aiuto logistico. Complessivamente i miei compagni e io trascorremmo sei estati e un inverno per studiare una colonia di albatros sull'Isola Bird, al largo della punta nord-occidentale della Georgia del Sud.

Ancor oggi non si conosce bene quale sia l'area di distribuzione dei grandi albatros: le nostre informazioni piú sicure sulla loro diffusione oceanica sono ancora quelle fornite dal capitano C.C. Dixon, dopo molti anni passati sul mare. Dixon ammise di non poter distinguere le due specie, sul mare, ma ciò non toglie nulla al valore del suo lavoro. Al momento del suo ritiro, nel 1919, aveva accumulato 3500 giorni di osservazioni (le aveva iniziate infatti nel 1892), dalle quali si può ricavare che l'area di distribuzione di questi uccelli negli oceani meridionali sta tra i 30 e i 60 gradi di latitudine sud. Alcuni grandi albatros possono giungere volando fino ai mari tropicali, raggiungendo il limite settentrionale di 18 gradi di latitudine sud: esemplari isolati sono stati visti attraversare l'Equatore, per spingersi nell'Atlantico settentrionale e persino entrare nel Mar Mediterraneo. L'estremità meridionale dell'area di distribuzione di questi uccelli è compresa all'interno dei mari antartici: l'avvistamento piú meridionale fu fatto per la prima volta dai membri della seconda spedizione antartica dell'ammiraglio Byrd, che osservarono un uccello nel Mare di Ross, a 69 gradi di latitudine sud.

I grandi albatros volano in stormi piú o meno numerosi sui vari mari a seconda delle stagioni. Dixon avvistò gli uccelli per lo più verso settentrione durante l'inverno, e verso meridione durante l'estate. Le migrazioni di ciascuna specie debbono ancora essere chiarite con precisione: si è da poco iniziato questo lavoro contrassegnando gli albatros sia nelle stagioni riproduttive sia in quelle invernali. Per esempio, negli anni successivi al 1950, parecchi ornitologi australiani studiarono i numerosi albatros urlatori riuniti d'inverno sul mare, al largo della costa del Nuovo Galles del Sud: nel 1958 iniziarono, a bordo di barche a motore, a catturare uccelli e a contrassegnarli. L'estate successiva (1958-59), senza sapere nulla del programma australiano, io pure cominciai a studiare gli albatros urlatori che si riproducono nella Georgia del Sud, e in dicembre trovai un uccello che portava un contrassegno messo nei mari australiani nel luglio precedente. Nel luglio successivo si registrò una migrazione inversa, quando un giovane albatros urlatore, che avevo contrassegnato nella Georgia del Sud, fu ritrovato al largo dell'Australia. Nelle ricerche eseguite durante i successivi cinque anni queste migrazioni si dimostrarono tutt'altro che rare. Dei 1477 albatros adulti catturati e contrassegnati al largo dell'Australia orientale, 50 furono ritrovati, spesso più di una volta nella Georgia del Sud. Nello stesso periodo 6601 albatros furono contrassegnati nella Georgia del Sud e, di questi, 14 furono ritrovati al largo dell'Australia. Su 64 passaggi tra le due aree, 27 furono compiuti in meno di 6 mesi; 12 uccelli compirono un tragitto di andata e ritorno, e uno di questi impiegò, per l'intero percorso, appena 12 mesi: è chiaro perciò che questi uccelli



Quando si scorgono da lontano, è assai difficile distinguere gli albatros urlatori adulti da tutti gli albatros reali: infatti i primi variano gradualmente di colore, dallo scuro al chiaro (*a-d*) con l'età, mentre i reali si coprono subito di un piumaggio bianco (*e*).



I due grandi albatros si possono distinguere per la colorazione e per la forma di alcune parti del capo. L'albatros reale ha le palpebre e i bordi della mascella superiore neri; le narici sono arrotondate (*in alto*). L'albatros urlatore ha palpebre e mascelle bianche; le narici sono meno arrotondate (*in basso*). Poiché queste caratteristiche non sono visibili da lontano, un tempo non era nota l'esistenza di due specie distinte.

non vagano a caso, ma navigano in direzioni ben precise su lunghe distanze, tra le aree di nidificazione e le zone dove svernano.

Uno dei dati piú precisi, sulla velocità che i grandi albatros mantengono in volo, fu fornito dal capitano Hiram Luther molto prima dell'avvento della tecnica moderna di inanellamento: egli infatti il 30 dicembre 1847, sulla baleniera *Cachalot*, al largo della costa pacifica dell'America meridionale, a 43° 24' di latitudine sud e 79° 5' di longitudine ovest uccise con una fucilata un grande albatros che aveva una fiala legata al collo contenente il seguente messaggio: « 8 dicembre 1847. Nave *Euphrates*, Edwards, 16 mesi di navigazione, 2300 barili d'olio, di cui 150 di spermaceti. Non ho visto una balena per 4 mesi. Latitudine 43° sud, longitudine 148° 40' ovest. Nebbia fitta e pioggia ».

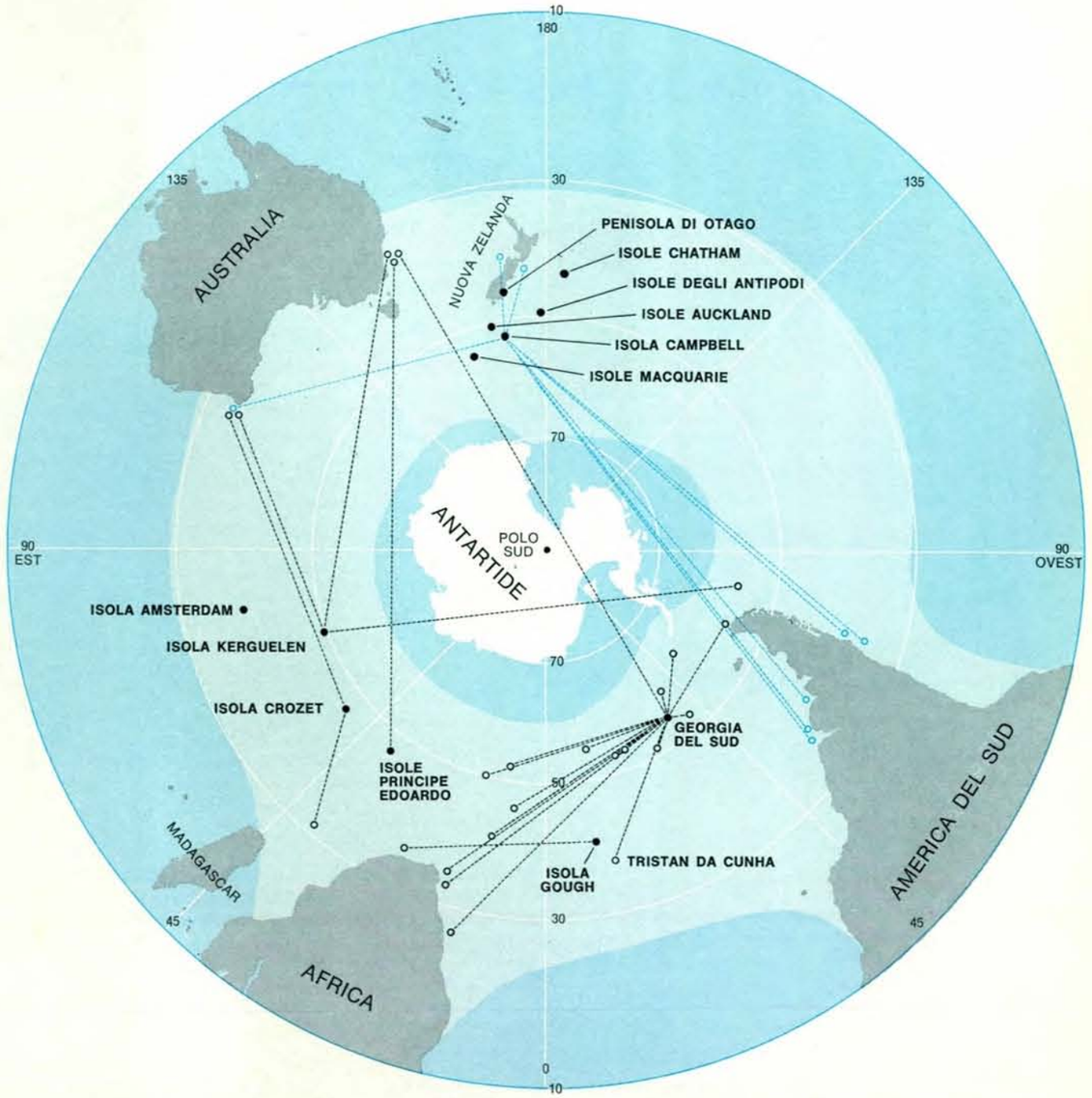
L'uccello aveva percorso, in 22 giorni, 2950 miglia nautiche tra il rilascio e la ricattura, quindi in media 134 miglia al giorno (circa 250 km). Mantenendo questa velocità « di crociera » un albatros potrebbe compiere il volo di 7000 miglia tra la Georgia del Sud e l'Australia orientale in meno di otto settimane: teoricamente un albatros potrebbe circumnavigare l'emisfero australe parecchie volte all'anno.

Secondo le osservazioni fatte da studiosi australiani i grandi albatros non stanno mai fermi in un territorio dove possono procurarsi cibo, ma si spostano spesso verso altre aree: al largo del Nuovo Galles del Sud l'arrivo degli uccelli è in relazione con l'apparizione di branchi di grosse seppie, seguite da una moltitudine di grandi predatori, tra cui i delfini; gli albatros infatti, si cibano degli avanzi dei delfini. I territori osservati da noi attirano uccelli da molte altre aree di nidificazione. Tra gli albatros urlatori che migrano lungo i mari del Nuovo Galles del Sud, vi sono uccelli provenienti dalle Isole Principe Edoardo, dalle Isole Crozet, dall'Isola Kerguelen e dalle Isole Auckland (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

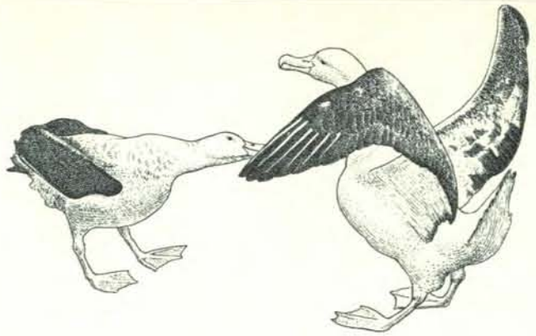
Benché gli albatros reali si trovino raramente nei mari australiani, altri territori sono la meta di entrambe le specie in cerca di cibo. Sia gli albatros urlatori, contrassegnati nella Georgia del Sud, sia quelli reali, contrassegnati sull'Isola Campbell, sono stati ritrovati tra le moltitudini di uccelli marini che si radunano attorno ai pescherecci nella vasta area di pesca atlantica al largo delle coste dell'Argentina.

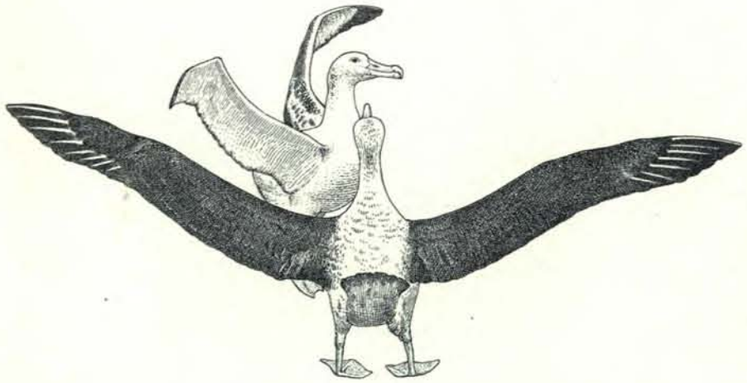
I grandi albatros si sono evoluti adattandosi all'ambiente marino, ma divenendo meno agili sulla terraferma; di conseguenza, la caratteristica costante dei loro territori di nidificazione è un lento pendio esposto ai venti, che rende facile il decollo. Gli uccelli trovano tali pendii esclusivamente nelle piccole isole disabitate sud-antartiche degli Oceani Atlantico, Indiano e Pacifico. Le isole dove nidificano, oltre a quelle già citate, sono: Tristan da Cunha, l'Isola Gough, l'Isola Amsterdam, le Isole Macquarie e le Isole degli Antipodi. I nidi delle due specie si trovano nel medesimo luogo solo sull'Isola Campbell e sulle Isole Auckland.

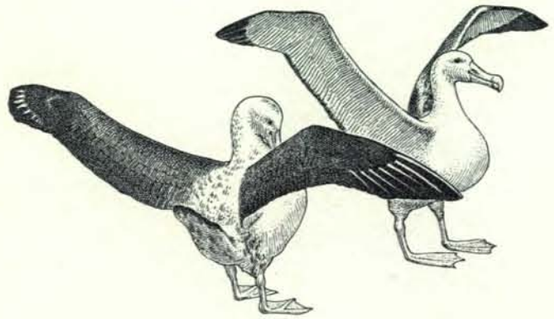
A causa dell'isolamento delle aree di nidificazione, i grandi albatros hanno come unico nemico naturale l'uomo. Alla fine del XVIII secolo e all'inizio del XIX, dopo la scoperta delle zone di nidificazione, navi inglesi e statunitensi spesso transitavano nei pressi di quelle isole. Talvolta naufraghi sopravvivevano su di esse per mesi e persino per anni; in tali occasioni gli uccelli e le loro uova venivano usati come cibo, e perciò, in alcuni luoghi, furono quasi completamente sterminati. Le caverne delle Isole Macquarie, un tempo occupate da cacciatori di foche, sono disseminate di crani di albatros urlatori. Nel 1913, quando una pattuglia della spedizione antartica australiana di Sir Douglas Mawson svernò sulle Macquarie, poté trovare un solo nido d'albatros. Tuttavia, nel periodo successivo alla II guerra mondiale, i visitatori australiani di queste isole hanno scoperto che la popolazione di albatros urlatori

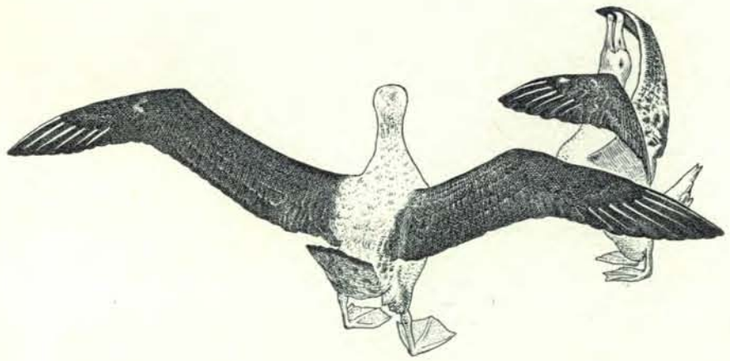


L'area di distribuzione dei grandi albatros si estende per lo piú fra i 30 e i 60 gradi di latitudine sud; nella carta sono indicate le isole su cui le due specie nidificano. Le linee tratteggiate uniscono le isole con territori in cui gli uccelli svernano, secondo i dati forniti da uccelli contrassegnati nei nidi, ritrovati poi sul mare, o viceversa: le linee nere si riferiscono all'albatros urlatore, quelle colorate all'albatros reale. L'orientamento di una linea non rappresenta il percorso in volo di un uccello.









ha superato questa crisi e sta di nuovo proliferando.

Nel periodo riproduttivo la femmina del grande albatros depone un solo uovo: se riesce a schiudersi e l'uccellino sopravvive, i genitori lo devono imboccare per tutto l'inverno, finché non sia capace di volare e di badare a sè stesso sul mare. Perciò una coppia di albatros si può riprodurre solo una volta ogni due anni. L'apparato neuroendocrino degli uccelli può evidentemente rispondere a stimoli esterni, promuovendo la rigenerazione, la crescita e la maturazione delle gonadi con un ciclo annuale, ma la presenza di un uovo o di un nidiaceo dà inizio a una reazione che interrompe il ciclo dopo la solita regressione delle gonadi in seguito all'accoppiamento e inibisce la rigenerazione normale per 10 mesi. Questo è un ottimo meccanismo di adattamento: dà alla coppia la possibilità di riprodursi ogni anno, inibendola solo quando c'è un'alta probabilità che la prole sopravviva.

Non appena i genitori cominciano a prendersi cura dell'uovo, la loro capacità di riprodursi nell'anno successivo diminuisce gradualmente. L'uovo di albatros comune viene deposto di solito in dicembre: se l'uovo viene distrutto appena deposto, entrambi i genitori si allontanano sul mare e ritornano nella stagione successiva per riprodursi. A partire da marzo, quando l'uovo si schiude, la coppia che perde l'uovo o il piccolo ha probabilità assai inferiori di riprodursi nel dicembre successivo; piú l'uccellino resta nel nido tanto piú diminuisce la possibilità di una nuova covata. Su 19 coppie di albatros comuni che persero i loro nidiacei nella Georgia del Sud tra il marzo e il giugno del 1963, solo 12 riuscirono a riprodursi nel dicembre successivo; nessuna delle 16 coppie che avevano perso i nidiacei tra giugno e ottobre riuscí nello stesso intento.

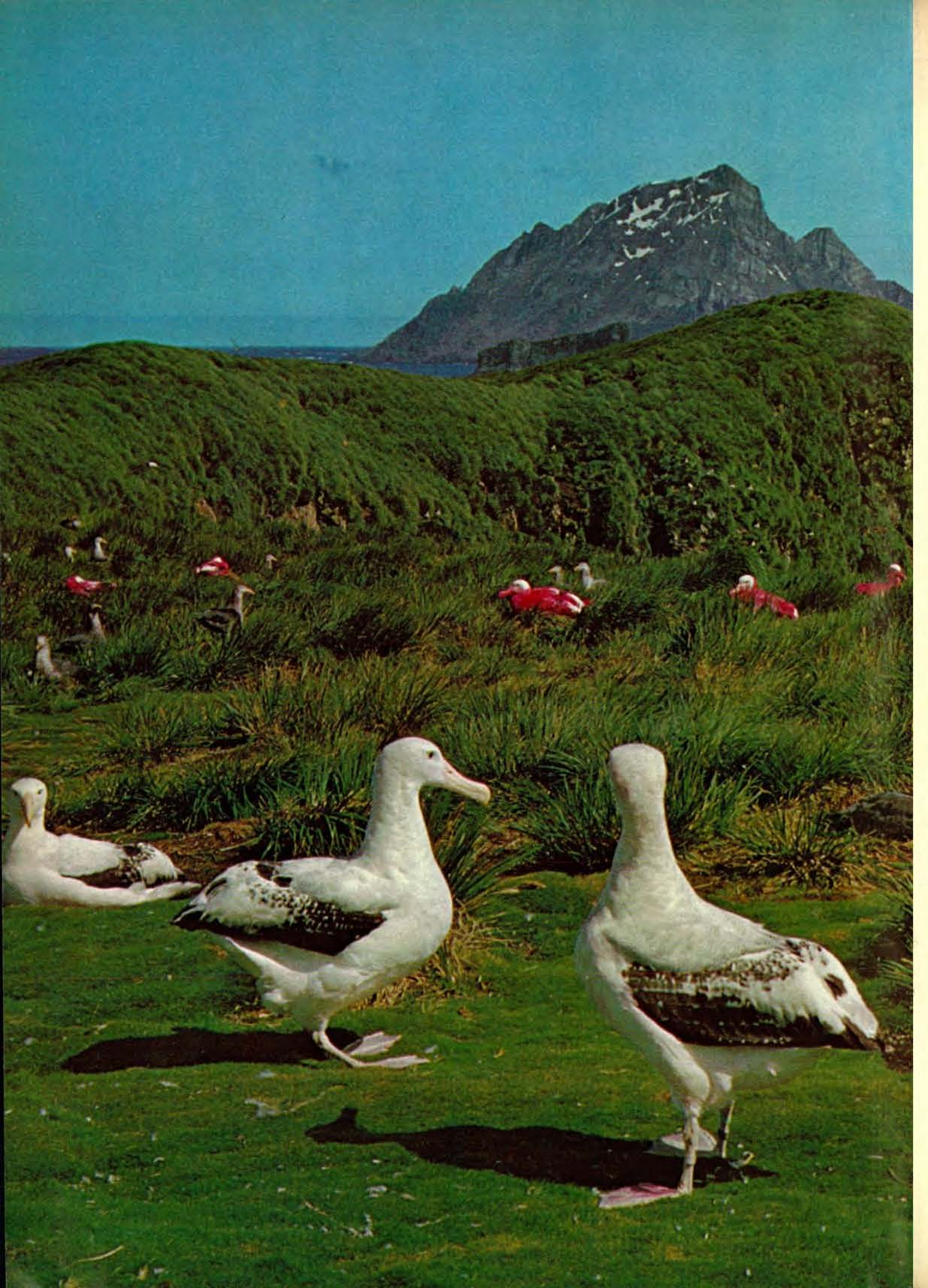
Teoricamente, se da ogni uovo deposto dalla femmina dell'albatros si sviluppasse un piccolo, esattamente metà della popolazione di ogni area di nidificazione si riprodurrebbe l'anno successivo e le coppie sarebbero sempre composte di individui della stessa mez-

Il corteggiamento dell'albatros urlatore è in realtà una competizione tra maschio e femmina non ancora accoppiati che hanno poca dimestichezza tra loro. I segnali, sia vocali che visivi, servono ad attrarre, respingere e tranquillizzare il compagno, finché i due uccelli si abituano l'un l'altro e non stabiliscono un legame coniugale.

Un albatros viene colorato per permettere la localizzazione della zona in cui gli albatros dell'isola Bird prendono il cibo.

Secondo avvistamenti eseguiti da navi gli uccelli si nutrono sul mare a circa 150 miglia a nord dal territorio di nidificazione.

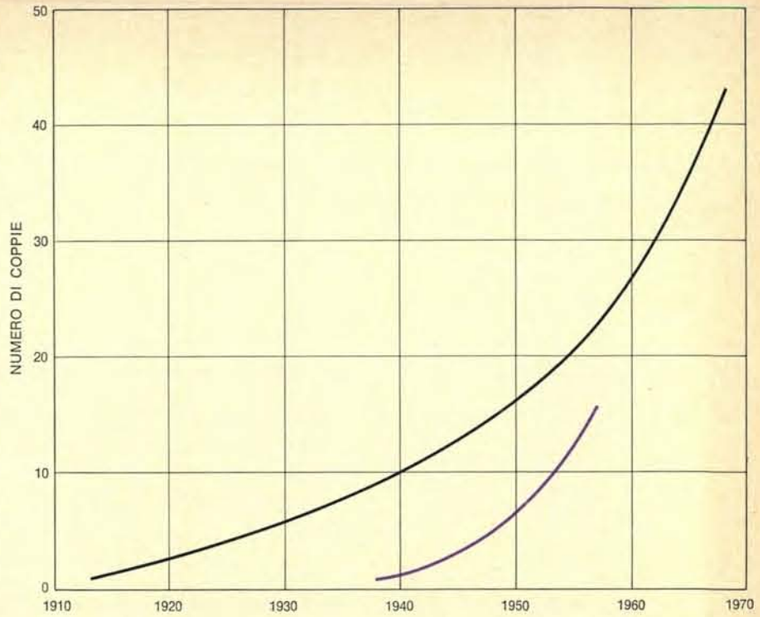
Uno dei ricercatori in visita sull'Isola Bird applica macchie di colore sulla testa di un albatros urlatore adulto: l'uso di contrassegni ha permesso ai ricercatori, durante lo studio sul ciclo riproduttivo di questi uccelli, di identificare i vari individui.



La foto della pagina a fronte mostra il territorio di nidificazione dell'albatros sull'Isola Bird, al largo della punta nord-ovest della Georgia meridionale, nelle acque subantartiche dell'Atlantico. I tre grandi uccelli in primo piano sono albatros urlatori (*Diomedea exulans*). Gli uccelli rosa sono stati colorati per un esperimento eseguito dall'autore e dai suoi colleghi. Gli altri uccelli sono ossifraghe (*Macroncetes giganteus*) e albatros piú piccoli. L'altro grande albatros, quello reale (*Diomedea epomophora*), non nidifica su quest'isola.

za popolazione. Se d'altra parte tutte le uova deposte in un'estate fossero distrutte, le coppie di quella mezza popopolazione che si riproduce tornerebbero a riprodursi l'annò successivo e si aggiungerebbero all'altra metà, cosicché l'intera popolazione nidificherebbe insieme in una sola stagione. Naturalmente, in realtà, questi due casi estremi non si verificano. Tra uccelli che non vengono disturbati la mortalità naturale di uova e uccellini provoca semplicemente il passaggio di alcune coppie da una metà della popolazione all'altra: la « semipopolazione stabilizzata » è di solito superiore alla metà della popolazione biennale totale. L'entità della semipopolazione è in rapporto alla perdita media di uova e di neonati. Nella Georgia del Sud il 20 per cento delle coppie che si riproducono annualmente non riuscirono a portare a termine il loro compito e nidificarono nuovamente l'anno successivo, cosicché la semipopolazione era il 55 per cento del totale.

La dinamica della popolazione dei grandi albatros è complicata da questo ciclo riproduttivo biennale. Si può solo determinare il totale di coppie che fanno il nido considerando due censimenti annuali e sottraendo le coppie che non riescono a riprodursi nel primo anno, ma solo nel successivo. Perciò se non si conosce la percentuale di sopravvivenza di uova e piccoli in tutti i territori di riproduzione, è impossibile fare una stima precisa della popolazione mondiale dei grandi albatros. Tuttavia la maggior parte delle isole su cui questi uccelli nidificano è stata visitata: secondo un calcolo grossolano vi sono circa 10 000 coppie di albatros reali, quasi tutte sull'Isola Campbell e le Isole Chatham. Piú di 14 000 coppie di albatros urlatori nidificano in 9 delle 11 isole dove questi uccelli si riproducono; quando questa cifra sarà integrata dal censimento delle Isole Kerguelen e Amsterdam, è probabile che la stima totale cresca a circa 20 000 coppie, ossia al doppio del numero di albatros reali. Quando saremo in grado di aggiungere a queste valutazioni il numero di piccoli di ciascuna



L'incremento della popolazione nelle due specie di grandi albatros è quasi analogo. La prima curva (*in nero*) illustra l'aumento degli albatros urlatori sulle Isole Macquarie dal 1913, quando si trovò un solo nido d'albatros. La seconda curva (*in colore*) indica l'aumento degli albatros reali nella Nuova Zelanda, dal 1938 al 1960.

specie, otterremo un totale certamente molto piú alto.

Il ciclo vitale degli albatros è eccezionale per la lunga durata del periodo in cui mettono le penne: in media 236 giorni per gli albatros reali e 278 giorni per gli albatros urlatori. La differenza di 42 giorni tra specie sotto altri aspetti cosí simili è stupefacente ed è quasi certamente in relazione con le differenti condizioni di nidificazione: nella Georgia del Sud, isola subantartica completamente coperta di neve per parecchi mesi in inverno, la temperatura media dell'aria è –2 °C, mentre nella Nuova Zelanda e nelle isole vicine l'inverno è molto piú mite, e sulla penisola di Otago la temperatura media del mese invernale piú freddo (luglio) è di 7 °C e vi sono circa 5 giorni di neve all'anno. Ne consegue che la necessità metabolica di isolamento termico e la produzione di calore sono probabilmente molto inferiori nei giovani albatros reali della Nuova Zelanda che in quelli urlatori della Georgia del Sud. La differenza climatica è forse la causa principale del fatto che i giovani albatros urlatori ricevono piú cibo, crescono di piú e impiegano piú tempo per perdere il peso in eccesso prima di volare, rispetto ai piccoli albatros reali. Questa conclusione è provata da osservazioni sullo sviluppo del piumaggio: i piccoli albatros urlatori rimangono coperti da piumino circa 60 giorni piú a lungo dei reali, mentre la crescita delle penne primarie dura circa lo stesso tempo nelle due specie.

Appena nato, un piccolo albatros pesa 300-400 grammi: i genitori non lo nutrono nelle prime 24 ore di vita, e nei successivi tre giorni gli somministrano solo piccole quantità di olio secreto dallo stomaco. Poi i pasti diventano gradualmente piú sostanziosi: dopo 32 giorni, quando il peso dell'animaletto è di circa 3 kg, i meccanismi termoregolatori dell'uccellino sono sufficientemente perfezionati e la cova non è piú necessaria.

Terminato il periodo di cova, i genitori si recano sul mare per pescare pesci e calamari, per poi somministrarli al piccolo ancora nel nido, sottoforma di una polpa, rigurgitata e parzialmente digerita. Il piccolo riceve un pasto all'incirca ogni tre giorni, per una media mensile di 9 kg di polpa e un totale di circa 80 kg per i 250 giorni che intercorrono tra la fine della covata e il primo volo. Il suo peso corporeo varia molto di giorno in giorno, a seconda della quantità di cibo inghiottito. Tuttavia, calcolando la media del peso giornaliero tra 24 giovani albatros urlatori sotto osservazione della stazione dell'Isola Bird, si è potuto costruire una curva, caratteristica per tutti i procellariformi.

La stabilizzazione del peso dei giovani uccelli viene raggiunta tra gli 80

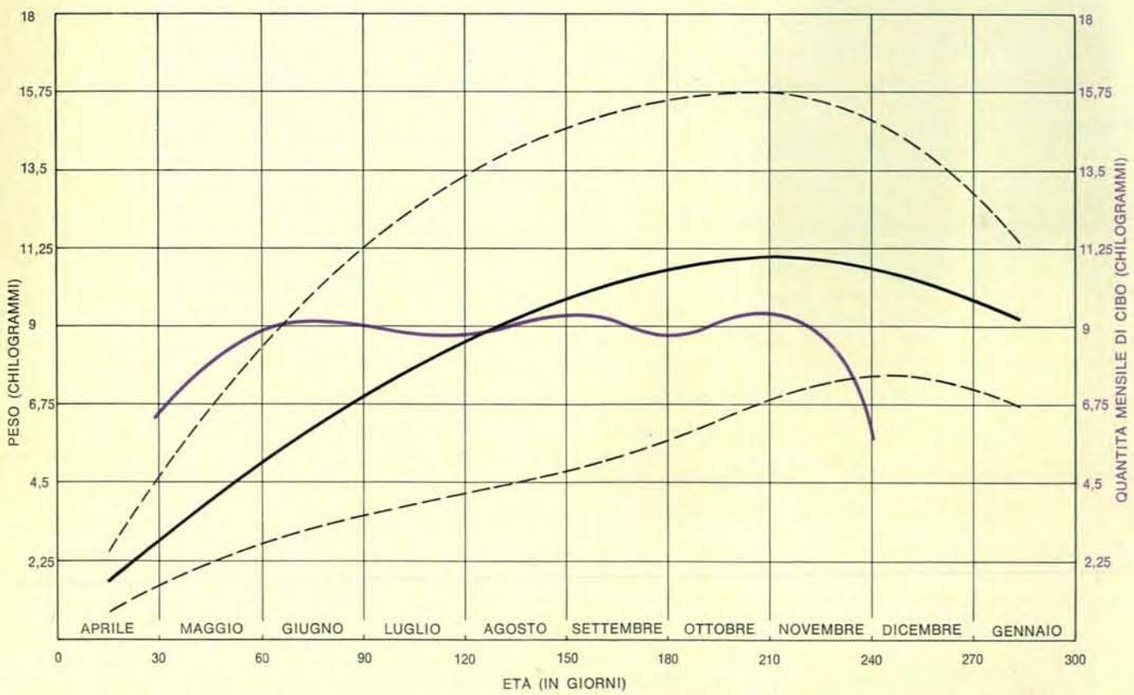
e i 40 giorni prima della partenza, poi le cure dei genitori cominciano a diminuire, i pasti divengono meno frequenti e il peso dei giovani uccelli inizia a calare; in molti studi sulle colonie di procellarie questo è stato definito come il « periodo della fame », benché si tratti di una espressione imprecisa: infatti, sebbene i genitori offrano meno pasti al piccolo, tuttavia gli portano sempre cibo. L'intervallo medio che noi abbiamo potuto osservare tra l'ultimo pasto e la partenza per 19 piccoli albatros dell'Isola Bird è stato di 6,8 ± 1,4 giorni: tutti 19 però avevano digiunato molto piú a lungo (14 ± 1 giorni) nel periodo in cui erano ricoperti di piumino.

Nonostante la considerevole potenza di volo dei genitori, la necessità di alimentare il piccolo uccello circa ogni tre giorni impone una limitazione sostanziale all'area oceanica di ricerca di cibo: il rifornimentto principale dev'essere, infatti, disponibile per tutto l'anno in meno di 36 ore di volo dal nido, che equivale a un raggio di circa 200 miglia nautiche. Non molto a nord dell'isola della Georgia del Sud si trovano alte concentrazioni di zooplancton; questa riserva di cibo spiega anche l'abbondanza di balene, un tempo, nelle zone vicine. Per scoprire se i genitori provenienti dai nidi dell'Isola Bird si procurassero cibo in questa zona ricca di organismi marini, contrassegnammo parecchie centinaia di albatros con un colore rosa (*si veda la figura in alto a pagina 53*): chiedemmo informazioni, sia agli equipaggi delle numerose baleniere che ancora attraversano la zona e sia alle navi di spedizioni antartiche transitanti nei paraggi, su avvistamenti di uccelli colorati. Ricevemmo un numero tale di rapporti da poter dimostrare che molti albatros rosa, provenienti dalla Georgia del Sud, si nutrivano nelle acque ricche di plancton in un raggio di 150 miglia dall'isola.

Quando il giovane albatros lascia il nido, vive sul mare per alcuni anni nei medesimi luoghi prima occupati dagli adulti. Gli uccelli giovani cominciano a tornare a passare l'estate nell'isola dove sono nati solo dopo i 4 anni. Sull'Isola Bird circa il 50 per cento dei 656 albatros urlatori, da noi contrassegnati nel primo anno di vita durante la nostra prima stagione di permanenza, erano ritornati nella Georgia del Sud nel periodo in cui avevano un'età di 6 anni. Il periodo di permanenza sul mare nei primi anni di vita sembra sia piú lungo per gli albatros reali; finora si sa solo di tre uccelli, contrassegnati nel primo anno, che siano tornati al Capo Taiaroa: uno aveva 6 anni, gli altri due 8 anni.

La percentuale di mortalità dei grandi albatros è nettamente inferiore a quella, assai elevata, di molti altri uccelli. Sull'Isola Campbell il 75 per cento di uova di albatros reale (e sull'Isola Bird il 58 per cento di uova di albatros urlatore) producono uccelli in grado di sopravvivere. Metà degli albatros nati sull'Isola Bird sopravvivono fino all'età di 6 anni e ritornano al territorio di nidificazione. Quando questi uccelli raggiungono la maturità, a 10 anni d'età, la percentuale di mortalità è diminuita a un livello di circa il 4,3 per cento: negli albatros reali adulti la percentuale diminuisce fino a raggiungere il 3 per cento.

Quando i giovani ritornano per la prima volta al territorio natio, non hanno ancora una compagna. Gli adulti invece, nel caso in cui un membro della coppia sia morto, cercano un compagno (o una compagna) non appena giungono, l'estate successiva, nel territorio di nidificazione. Col passare degli anni i giovani cominciano a unirsi alle danze che costituiscono il rituale di corteggiamento: queste esibizioni vengono eseguite da un solo maschio



L'aumento di peso di un giovane albatros, nei nove mesi compresi tra la nascita e il primo volo, varia notevolmente di giorno in giorno, ma segue una curva caratteristica (*in nero*) calcolata in base a misure effettuate su 24 nidiacei. La quantità media di cibo ricevuto mensilmente (*in colore*) si abbassa rapidamente quando i giovani uccelli si preparano a lasciare l'isola

e da una o piú femmine. Le femmine sono attratte dai maschi, ma i maschi spesso sono restii a permettere alle femmine di avvicinarsi troppo.

La rappresentazione consiste in una serie di segnali visivi che alternativamente attraggono, respingono e rappacificano la potenziale compagna. Gradualmente il maschio passa sempre piú tempo con una femmina particolare e il numero delle sue danze diminuisce: alla fine si stabilisce un legame coniugale; maschio e femmina si riconoscono a vicenda senza esitazione e il loro incontro non provoca piú le reazioni stereotipate e agonistiche della danza.

Il giovane albatros passa circa cinque anni sul mare, presumibilmente imparando a conoscere l'ambiente marino: questa esperienza iniziale è seguita da circa cinque estati di corteggiamento e cinque inverni sul mare.

Le due distinte specie di grandi albatros sono, come già detto, notevolmente simili: tranne le differenze di lunghezza del periodo in cui mettono le penne e di colore del piumaggio dei giovani, la maggior parte delle variazioni riscontrabili non sono maggiori di quelle che ci sono tra le razze della medesima specie; è possibile che entrambe le eccezioni siano dovute a tipiche reazioni all'ambiente. Come ho già fatto notare, il clima invernale piú mite della Nuova Zelanda permette probabilmente all'albatros reale di mettere le penne prima di quanto accada all'albatros urlatore: perciò quando la coppia di adulti reali pronti a riprodursi raggiunge Capo Taiaroa per iniziare la costruzione del nido, tutti o quasi tutti gli uccelletti nati nella stagione precedente sono già partiti per la loro prima estate sul mare.

Il periodo in cui il giovane albatros urlatore mette le penne è talmente piú lungo che, quando gli adulti ritornano all'Isola Bird per riprodursi, molti giovani nati nella stagione precedente occupano ancora il territorio di nidificazione. La data media dell'arrivo dei maschi adulti sull'Isola Bird è il 30 novembre: le femmine adulte arrivano attorno al 10 dicembre, che è pure la data media di partenza per gli uccelli nati nella stagione precedente. In questo periodo i giovani albatros sono molto indaffarati e aggressivi, e si comportano in modo da interferire con la costruzione del nido da parte degli adulti.

I due grandi albatros, urlatore e reale, non solo condividono una parte del loro habitat sull'oceano, ma nidificano insieme su due isole. Inoltre le notevoli differenze tra le entità delle due popolazioni e la posizione dei loro principali territori di riproduzione evidentemente riflettono un'evoluzione in tempi relativamente recenti delle due specie da un unico ceppo ancestrale. Le regioni temperato-fredde e subantartiche dell'emisfero meridionale costituiscono un ambiente poco ospitale, dove di rado si sviluppano nuove nicchie ecologiche. Tuttavia, le vicende degli avanzamenti, delle soste e dei ritiri glaciali che caratterizzarono il periodo pleistocenico dell'emisfero settentrionale avevano la loro controparte nell'emisfero meridionale, dove la distesa dei ghiacci antartici e la fronte dei ghiacciai avanzavano e si ritiravano nel medesimo modo.

Questi flussi e riflussi glaciali probabilmente frammentarono e alterarono un ambiente che precedentemente era stato favorevole al mantenimento di un unico ceppo, progenitore delle due specie attuali di grandi albatros. Le fluttuazioni della copertura glaciale cambiarono la vegetazione delle isole su cui gli uccelli nidificavano; le variazioni di temperatura e di salinità del mare influenzarono certamente la disponibilità di cibo marino a portata di volo. Nel corso di tali variazioni alcune isole probabilmente rimasero isolate. Un'interruzione del normale scambio genetico fra diversi territori di nidificazione può essere stato sufficiente per permettere lo sviluppo di due linee separate di grandi albatros: in seguito la sparizione di queste barriere pleistoceniche permise con ogni probabilità una nuova espansione delle aree di distribuzione delle due specie, rimettendo in contatto l'albatros reale e l'albatros urlatore, limitatamente però ai mari a sud della Nuova Zelanda.

In pieno inverno un piccolo albatros, ben protetto dallo spesso piumino e da uno strato di grasso sottocutaneo, riceve 900 grammi di pesce dai genitori ogni tre giorni.

A nove mesi d'età, già ricoperto di penne, un giovane albatros urlatore si espone al vento su un pendio dell'Isola Bird, e stende le ali in vista dell'imminente primo volo.

I magneti permanenti

Le nuove leghe a base di cobalto e di alcuni elementi delle terre rare possiedono proprietà talmente superiori a quelle dei materiali usati prima, da costituire virtualmente una nuova classe di magneti

di Joseph J. Becker

All'interno di numerose apparecchiature elettriche ed elettroniche si cela spesso piú di un magnete permanente. Tuttavia, gli unici magneti che normalmente si ha l'occasione di vedere, sono quelli che servono a tenere ermeticamente chiusi gli sportelli dei frigoriferi o quelli che, nei moderni apriscatole, attirano i coperchi metallici delle scatolette. In realtà i magneti, anche se spesso non sono visibili esteriormente, esercitano una notevole influenza sia sulla forma che sulle prestazioni di ogni strumento in cui vengono impiegati. Dovendo svolgere un determinato lavoro, quanto piú un magnete è potente in rapporto al suo volume, tanto piú ridotte possono essere le sue dimensioni. (La forma allungata dei vecchi ricevitori telefonici non era tanto determinata da esigenze di comodità e maneggevolezza quanto dalla necessità di sistemare al loro interno dei lunghi magneti di acciaio al tungsteno indispensabili al loro funzionamento).

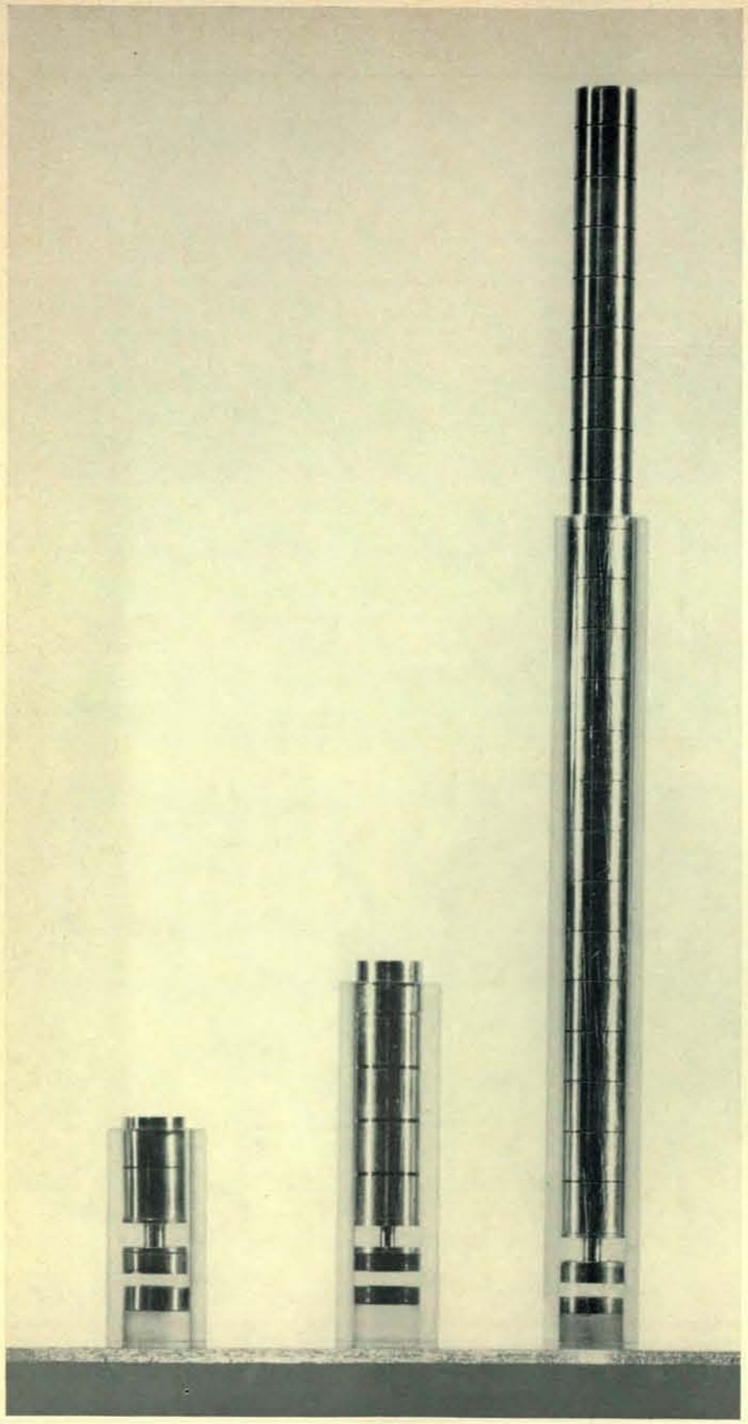
In questi ultimi anni, si è venuta sviluppando una nuova categoria di materiali per la costruzione di magneti permanenti a base di cobalto e di alcuni elementi delle terre rare. La qualità delle prestazioni rispetto a materiali di altro tipo è talmente superiore che si può affermare che i magneti a cobalto-terre rare costituiscano di per se stessi una classe. Per quanto concerne la loro resistenza alla smagnetizzazione, i nuovi materiali sono da venti a cinquanta volte migliori dei magneti convenzionali di tipo Alnico, e la loro energia magnetica è da due a sei volte maggiore. Di conseguenza, i magneti a cobalto e terre rare potrebbero ora trovare applicazione in casi in cui altri materiali non possono in alcun modo essere presi in considerazione.

Gli atomi degli elementi ferromagnetici quali il ferro, il cobalto e il nichel, posseggono uno strato elettronico che contiene un numero di elettroni minore del massimo numero consentito. In questi strati incompleti vi sono uno o piú spin elettronici spaiati che danno luogo a un piccolo momento magnetico trasformando l'atomo stesso in un minuscolo magnete. In un grande insieme di atomi di questo tipo i magneti atomici sono generalmente orientati in varie direzioni in modo tale da elidersi a vicenda. D'altra parte, se un campione di un materiale ferromagnetico viene posto in un campo magnetico, i singoli magneti atomici tendono a orientarsi secondo la direzione del campo ed esso conserva pertanto un magnetismo residuo con un polo nord e un polo sud chiaramente osservabili. La magnetizzazione totale (M) di un frammento di materiale è la somma dei contributi di tutti i magneti atomici elementari. Ora, se tutti i magneti atomici sono paralleli e sono orientati nel medesimo verso, la magnetizzazione raggiunge, in quella direzione, il punto di saturazione, vale a dire il suo massimo valore.

Le sostanze magnetiche vengono tradizionalmente suddivise in due categorie: sostanze « dure » e sostanze « dolci ». Una sostanza dura è difficilmente magnetizzabile e smagnetizzabile, ed è proprio questa la qualità caratteristica di un magnete permanente. Le sostanze dolci presentano la proprietà opposta: si magnetizzano e si smagnetizzano con facilità. Quanto piú una sostanza è dolce, tanto piú essa è adatta a essere impiegata in quegli apparecchi elettrici in cui la magnetizzazione deve cambiare di segno molte volte in un secondo, come per esempio nei trasformatori. Traducendo questo diverso comportamento in un grafico in cui si ponga sull'asse delle ascisse il valore del campo magnetico applicato (H) e sull'asse delle ordinate il valore della magnetizzazione totale (M), si ottiene una curva caratteristica, simile a una S molto spessa, che si dice « ciclo di isteresi » (*si veda la figura a pagina 61 in alto*). Consideriamo ora una sostanza dura: il valore di M, supposto inizialmente nullo, si discosta assai poco dallo zero finché il campo applicato H non raggiunge un valore apprezzabile: a questo punto M cresce bruscamente. Cessato l'effetto del campo, il valore di M si mantiene elevato e il materiale conserva la sua magnetizzazione; per riportare M a zero è necessario invertire il segno o la polarità del campo applicato. Si dice « forza coercitiva intrinseca » (H_{ci}), il valore del campo per cui M si riduce nuovamente a zero. Se l'intensità del campo invertito viene ulteriormente aumentata, il materiale diverrà completamente magnetizzato con polarità opposta e rimarrà ancora magnetizzato al cessare dell'azione del campo. In altri termini, una sostanza magnetica dura si comporta come una pesante scatola posta su una superficie scabrosa: ha bisogno di una forte spinta per poter essere spostata e di un'altra spinta altrettanto forte per essere riportata nella posizione iniziale. Una sostanza dolce è invece come la stessa scatola montata su rulli: è facilmente spostabile da un punto del piano (stato di magnetizzazione) all'altro.

Quanto all'area del ciclo di isteresi, essa è abbastanza grande per le sostanze dure mentre è piuttosto piccola per le sostanze dolci. Poiché è necessario fornire energia per compiere un ciclo completo, è preferibile un ciclo di estensione il piú possibile limitata per tutte quelle applicazioni in cui è necessario invertire frequentemente la magnetizzazione (come nel caso dei trasformatori). La preparazione di materiali magnetici è generalmente legata al problema di indurire o di addolcire le sostanze magnetiche. La forza coercitiva intrinseca, che determina l'esten-

La struttura a domini magnetici di molte sostanze ferromagnetiche può essere messa in evidenza per mezzo di luce polarizzata. Questa microfotografia rappresenta un magnete permanente costruito con uno dei nuovi materiali, il cobalto-samario; ogni regione con un particolare tipo di conformazione raffigura un grano della colata. Quando la luce polarizzata viene riflessa dalla superficie levigata, il piano di polarizzazione ruota leggermente da una parte o dall'altra a seconda della direzione che la magnetizzazione ha all'interno di ogni dominio e questo si traduce in una serie di zone chiare e scure. All'interno di ogni grano le regioni chiare e scure hanno magnetizzazione opposta. Nei grani che presentano una configurazione a ruota dentata la magnetizzazione è, piú o meno, perpendicolare alla superficie ed è diretta verso l'interno o verso l'esterno. I grani a ruota dentata hanno forma esagonale perché il reticolo cristallino del cobalto-samario è esagonale e i contorni dei domini del materiale assumono di preferenza orientazioni particolari. La microfotografia di cui riproduciamo qui sopra un ingrandimento a 500 diametri, è stata eseguita dai ricercatori Curtis R. Rodd e Andrew S. Holik della General Electric.



La forza repulsiva di magneti di diverso tipo può essere messa a confronto ponendo due dischi di ciascuna sostanza con i poli dello stesso segno affacciati e aggiungendo dei pesi sino a ottenere distanze uguali tra i dischi. In questa fotografia, i dischi magnetici sono, da sinistra a destra, rispettivamente di Alnico, ferrite di bario e di cobalto-samario. Per rendere piú facilmente osservabile il fenomeno, il disco inferiore di ciascuna coppia è appoggiato a una base di plastica e quello superiore è separato dalla colonna di pesi per mezzo di un piccolo perno. Dei cilindri di plastica circondano i pesi per mantenerli in equilibrio. I tre pesi stanno tra loro nel rapporto 2 : 5 : 23.

sione del ciclo d'isteresi, può variare da meno di un centesimo di oersted, valore tipico delle leghe usate nelle apparecchiature telefoniche, sino a decine di migliaia di oersted come nei nuovi materiali a cobalto-terre rare. Si tenga presente, a titolo di esempio, che il valore del campo magnetico terrestre è di circa mezzo oersted.

Per descrivere il comportamento dei materiali magnetici si usano spesso delle curve di isteresi in cui si pone in ordinata il valore del flusso d'induzione magnetica (B) in luogo della magnetizzazione M. In effetti, il flusso di induzione magnetica rappresenta sia il contributo della magnetizzazione che quello dell'intensità del campo magnetico (H). Ora, mentre nei problemi di carattere tecnico è preferibile usare il flusso d'induzione magnetica piuttosto che M, perché la prima è una quantità piú direttamente legata alle caratteristiche di funzionamento di molte macchine elettriche, il tecnico della materia preferisce invece ragionare in termini di magnetizzazione poiché essa descrive in modo piú diretto il comportamento della sostanza in un campo magnetico. Per quanto riguarda i nuovi materiali a cobalto-terre rare, sono ugualmente significative entrambe le quantità.

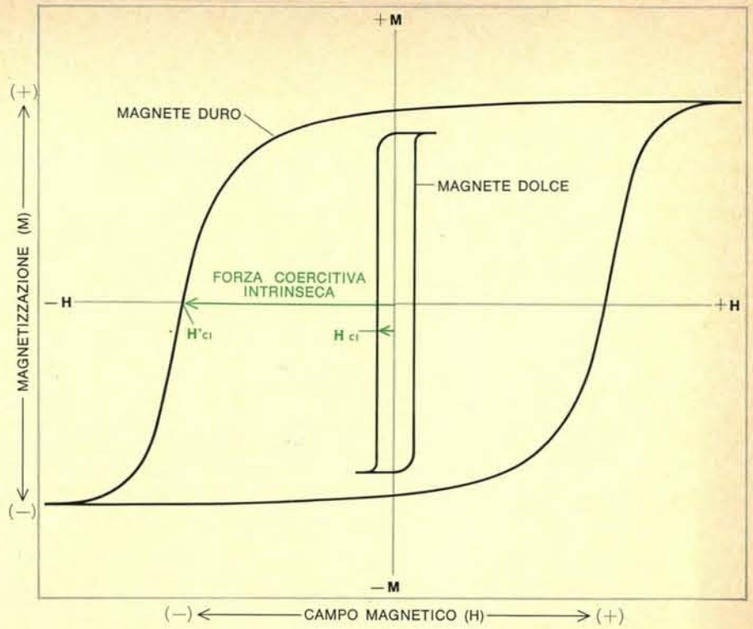
Quando si voglia assegnare un indice alla durezza di un magnete permanente, ci si riferisce generalmente al secondo quadrante della curva di B in funzione di H, quadrante in cui B e H hanno polarità opposte (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*). Il valore del campo applicato per cui l'induzione magnetica si annulla si dice semplicemente forza coercitiva (H_c). In questo quadrante, ogni punto della curva rappresenta un certo valore del prodotto di B per H: il punto in cui questo valore assume un massimo, si dice massimo prodotto di energia $(BH)_{max}$. Questo valore massimo è stato usato per anni come indice significativo della qualità di un magnete permanente.

Per i materiali dolci e per gran parte di quelli duri precedenti all'avvento dei materiali a cobalto-terre rare, la forza coercitiva ordinaria H_c e la forza coercitiva intrinseca H_{ci} sono praticamente coincidenti. Il campo che riduce a zero il flusso di induzione magnetica B smagnetizza completamente il materiale. Nei magneti a cobalto-terre rare invece, la forza coercitiva intrinseca può essere molto maggiore della forza coercitiva ordinaria, il che comporta notevoli conseguenze che rendono particolarmente interessanti questi materiali.

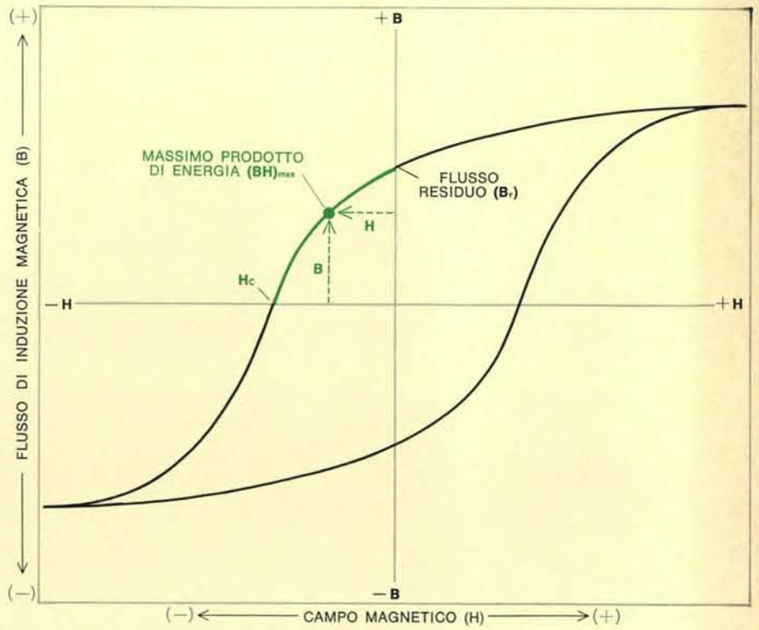
Si considerino infatti due magneti duri di uguale portata: il primo, un ordinario magnete di tipo Alnico, l'altro costruito con i nuovi materiali a base di terre rare. Se a ciascuno dei due magneti viene applicato un campo pari al valore della forza coercitiva, i risultati sono sensibilmente diversi. Nel magnete di tipo Alnico, non appena il flusso di induzione magnetica si annulla e il campo viene rimosso, il valore del flusso risale in modo trascurabile: in pratica il magnete si può considerare smagnetizzato (*si veda la figura a pagina 62*). Questo accade perché il valore della forza coercitiva H_c è quasi uguale a quello della forza coercitiva intrinseca H_{ci}. Il magnete Alnico sarebbe a questo punto inutilizzabile a meno che non venisse rimagnetizzato da un campo intenso.

Ripetendo l'esperienza con un magnete duro a cobalto-terre rare, si può osservare che un campo pari alla forza coercitiva del materiale riduce a zero l'induzione magnetica, come del resto avviene per il magnete Alnico, ma, in questo caso, quando il campo viene rimosso, il flusso riassume praticamente il valore iniziale. La spiegazione risiede nel fatto che i valori della forza coercitiva intrinseca sono, per i magneti a cobalto-terre rare, molto maggiori dei valori della forza coercitiva ordinaria. Di conseguenza, un campo smagnetizzante può portare a zero (o anche al di sotto dello zero) l'induzione magnetica senza alcuna ripercussione sulla magnetizzazione intrinseca M del materiale. Questa resistenza alla smagnetizzazione permanente non viene espressa dalla quantità « massimo prodotto di energia », ma è per lo meno altrettanto importante. I valori della forza coercitiva intrinseca nei magneti a cobalto-terre rare sono da venti a cinquanta volte maggiori di quelli dei magneti permanenti convenzionali (*si veda la figura a pagina 63*).

Questa capacità di opporsi alla smagnetizzazione dovrebbe quindi permettere di progettare dei motori a magneti permanenti molto piú potenti ed efficaci di quanto non fosse possibile in passato, utilizzando i nuovi materiali a base di terre rare. Infatti, l'indotto di un motore a magnete permanente è simile a quello di ogni altro motore a corrente continua; la differenza risiede nell'induttore che è costituito da un magnete permanente anziché da una struttura di ferro avvolta da un filamento di rame. Non richiedendo energia per eccitare il campo, i motori a magneti permanenti sono largamente usati negli strumenti ad accumulatori; esistono tuttavia dei limiti alla loro potenza dovuti al fatto che la corrente



Il ciclo di isteresi descrive il comportamento di tutti i materiali magnetici quando la loro magnetizzazione viene espressa in funzione del campo magnetico applicato H. Un magnete « duro » tende a opporsi fortemente a ogni cambiamento di direzione della sua magnetizzazione. Pertanto, in un materiale duro, il valore di M non può annullarsi sino a che il campo magnetico applicato non abbia raggiunto un valore che viene definito forza coercitiva intrinseca. Questa forza, (H_{ci}) è, nei materiali piú duri, decine di milioni di volte superiore al valore che essa può assumere nei materiali piú dolci.



La qualità di un magnete permanente viene di solito espressa numericamente per mezzo del suo « massimo prodotto di energia » $(BH)_{max}$. Esso indica il punto del secondo quadrante del ciclo di isteresi in cui il prodotto del flusso di induzione magnetica B e del campo magnetico H raggiunge il massimo valore. I segni algebrici di B e di H non vengono in questo caso presi in considerazione. Il valore assunto dal flusso quando il campo H è nullo, si dice flusso residuo B_r. La forza coercitiva H_c corrisponde al valore di H per cui B si annulla: non coincide con la forza coercitiva intrinseca H_{ci}.

massima dell'indotto non deve smagnetizzare il magnete di campo. Ora dovrebbe essere possibile superare tale limitazione data l'eccezionale resistenza che viene presentata alla smagnetizzazione da parte dei magneti a cobalto-terre rare.

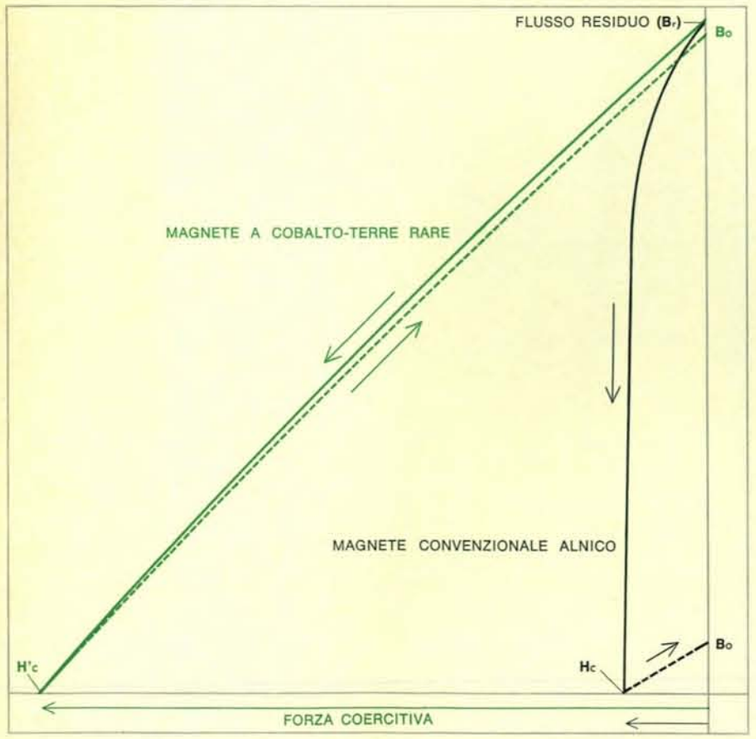
Il processo di indurimento di un magnete può essere teoricamente descritto in termini di « domini magnetici ». L'esistenza di microscopiche regioni, dette domini magnetici, in cui sono suddivisi gli ordinari materiali ferromagnetici, fu postulata per la prima volta nel 1907 e venne verificata sperimentalmente nel 1930 (*si veda la figura a pagina 59*). I singoli magneti atomici son disposti parallelamente all'interno di ogni dominio e la direzione in cui essi sono orientati determina la direzione di magnetizzazione di quel dominio. D'altra parte, i contorni dei domini non sono fissi ma possono spostarsi sotto l'azione di un campo magnetico: essi si spostano in modo tale che i domini in cui la magnetizzazione ha la stessa direzione del campo si espandono a spese degli altri. Pertanto la magnetizzazione totale, data dalla somma delle magnetizzazioni dei singoli domini, aumenta e, piú in generale, il movimento dei contorni può provocare sensibili variazioni di magnetizzazione.

Affinché un materiale magnetico diventi piú dolce è necessario che il movimento dei contorni dei domini venga facilitato al massimo. Per questa ragione, i magneti dolci sono di regola costruiti con materiali che posseggano una struttura uniforme e priva di inclusioni; essi vengono inoltre sottoposti a ricottura allo scopo di diminuire le tensioni interne. Per molto tempo, parve logico supporre che i materiali duri possedessero proprietà diametralmente opposte. I primi acciai al carbonio venivano raffreddati per tempra in modo da produrre una struttura detta martensite, costituita da un groviglio di aculei e di microscopiche lamine di una sostanza molto dura e altamente incrudita. Le leghe Alnico, introdotte alla fine degli anni trenta, debbono le loro proprietà magnetiche a una seconda fase intercristallina finemente dispersa, di precipitazione metallurgica.

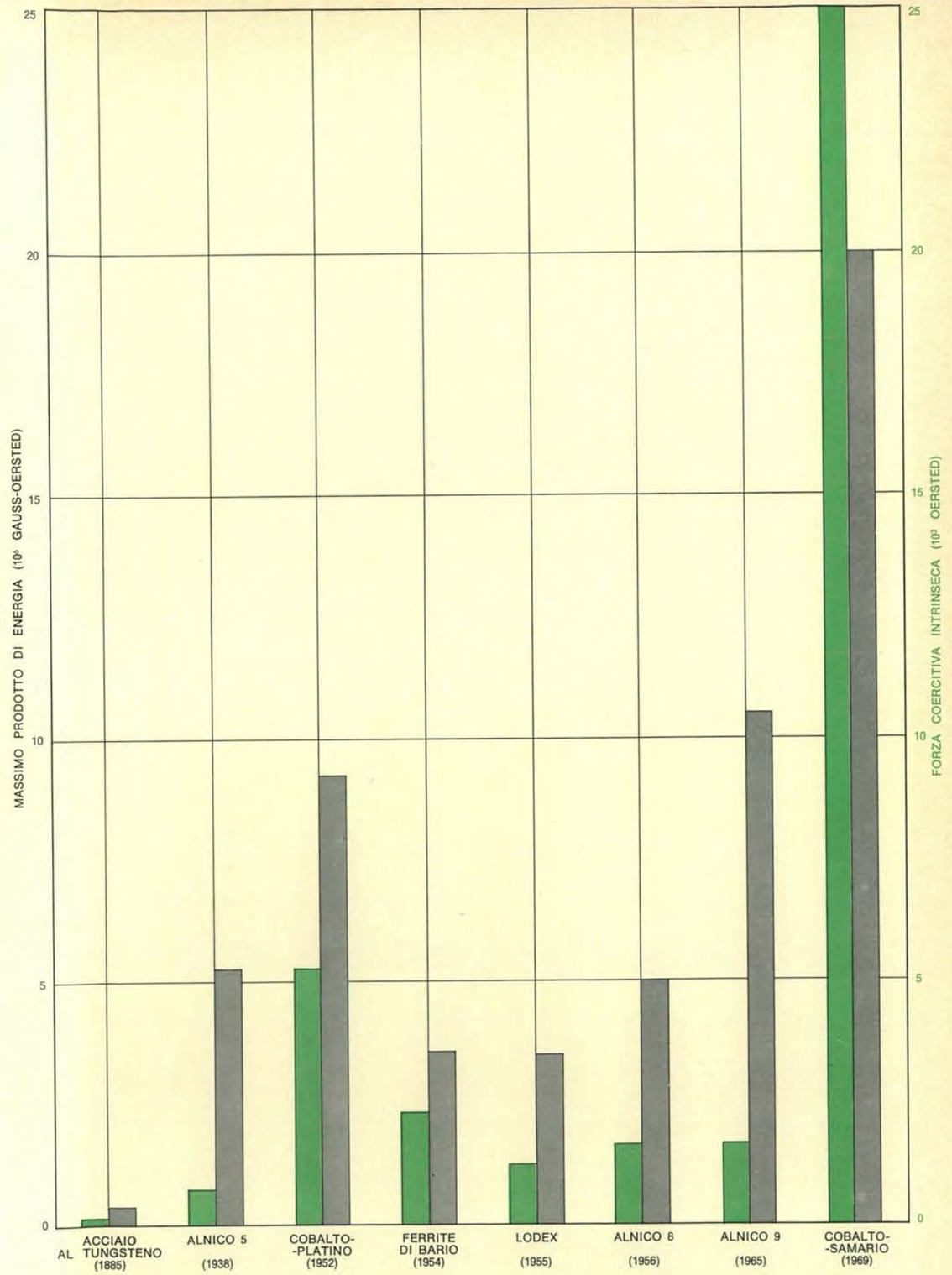
Intorno al 1950, diversi ricercatori (tra i quali il fisico francese Louis Néel che ha ricevuto il premio Nobel 1970 proprio per i suoi importanti contributi allo studio del magnetismo) proposero una nuova teoria per lo studio dei materiali magnetici duri partendo dall'idea secondo cui, riducendo opportunamente le dimensioni delle particelle ferromagnetiche, non vi sarebbe stato piú spazio per i contorni dei domini. Poiché l'inversione della magnetizzazione dovrebbe avvenire per rotazione della magnetizzazione dell'intera particella, il che è piú difficile da realizzare di quanto non lo sia lo spostamento dei contorni dei domini, le forze coercitive sarebbero risultate assai elevate. Le dimensioni delle particelle necessarie a realizzare le ipotesi di questa teoria dipendevano dal materiale scelto. Per il ferro, le dimensioni non dovevano superare qualche centesimo di angstrom, vale a dire l'ordine di grandezza delle dimensioni di un virus di medie proporzioni. Per ottenere le condizioni ideali, inoltre, le particelle dovrebbero essere di forma molto allungata in modo da rendere ancora piú difficile la rotazione della magnetizzazione.

Gli ingegnosi tentativi nella direzione di ottenere particelle di questo tipo hanno portato a materiali di grande utilità ma non hanno minimamente raggiunto le ottimistiche previsioni di alcuni dei primi sostenitori della teoria delle « particelle fini ». Lo scoglio principale sembra essere l'irregolarità della forma delle particelle. Particelle perfettamente omogenee, di forma allungata e di appropriate dimensioni permetterebbero di ottenere, secondo le previsioni della teoria, forze coercitive dell'ordine di diecimila oersted; tuttavia nessuno sa, almeno per ora, come produrle.

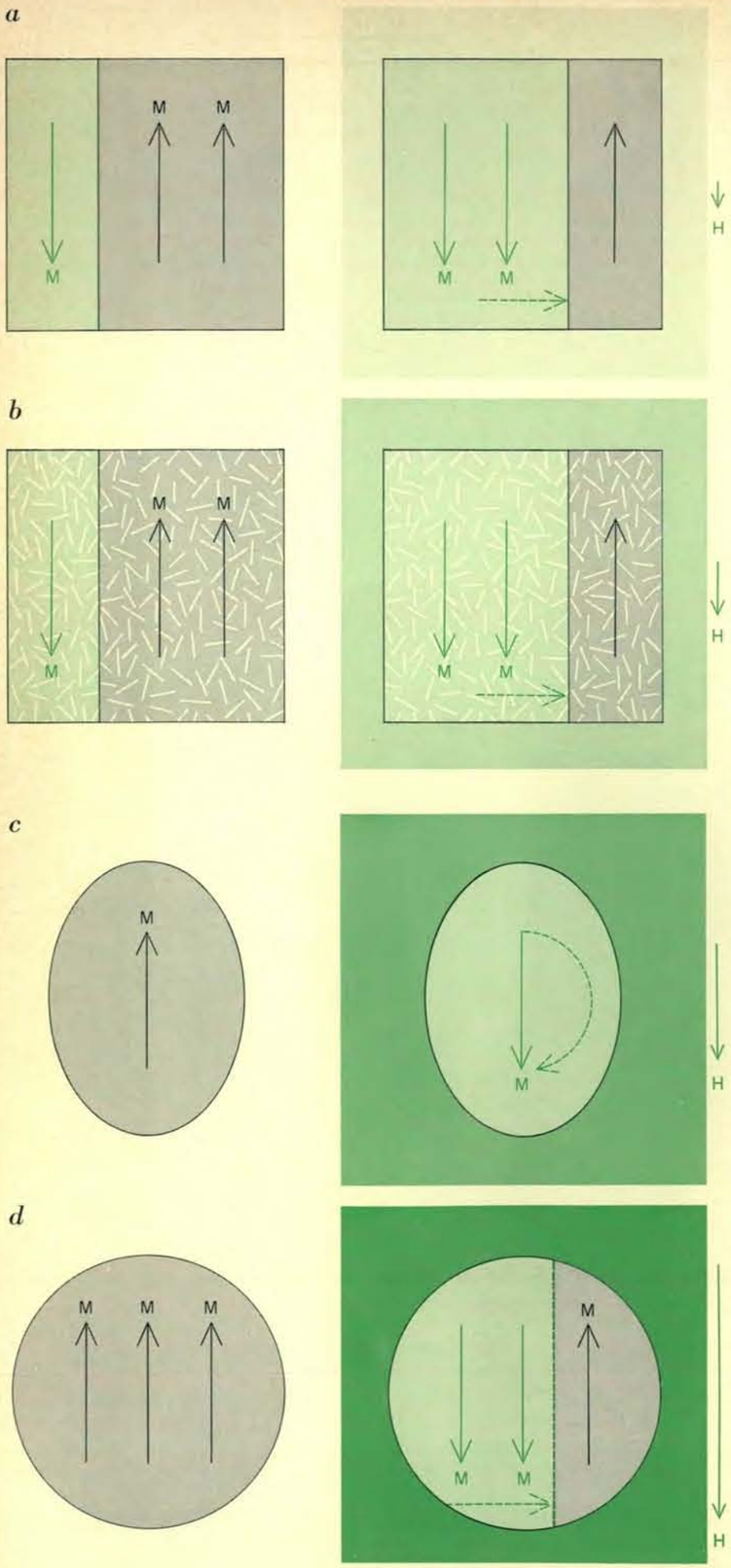
Non appena svanirono le speranze riposte in questa particolare teoria, gli interessi si spostarono in un'altra direzione, e cioè verso la ricerca di un'altra proprietà che rendesse i materiali cristallini capaci di opporsi alle rotazioni magnetiche. Ora, tutti i cristalli ferromagnetici sono anisotropi, vale a dire che la magnetizzazione preferisce certe direzioni cristallografiche – gli assi piú « docili » – ed è necessario fornire energia per far ruotare la magnetizzazione in altre direzioni. Il grado di anisotropia, inoltre, varia sensibilmente da sostanza a sostanza. Pertanto, se in un medesimo materiale si fosse riusciti a combinare sia una grande anisotropia sia una magnetizzazione ragionevolmente apprezzabile, il materia-



La risposta a un campo smagnetizzante avente lo stesso valore della forza coercitiva intrinseca del materiale è variabile. Se si elimina l'azione del campo quando esso ha raggiunto un valore pari alla forza coercitiva (H_c) in un magnete di tipo Alnico il flusso risale a un valore trascurabile B_o e il magnete deve nuovamente venire magnetizzato. Se si effettua la stessa operazione in un magnete a cobalto-terre rare, per il quale la forza coercitiva (H'_c) è maggiore, il flusso riassume praticamente il valore iniziale B_r.



I due indici della qualità di un magnete, vale a dire la forza coercitiva intrinseca (*in colore*) e il massimo prodotto di energia (*in grigio*), dimostrano chiaramente la notevole superiorità di prestazioni dei nuovi materiali a cobalto-samario rispetto ai materiali precedentemente usati. Le date indicano l'anno in cui i singoli materiali sono stati introdotti sul piano commerciale.



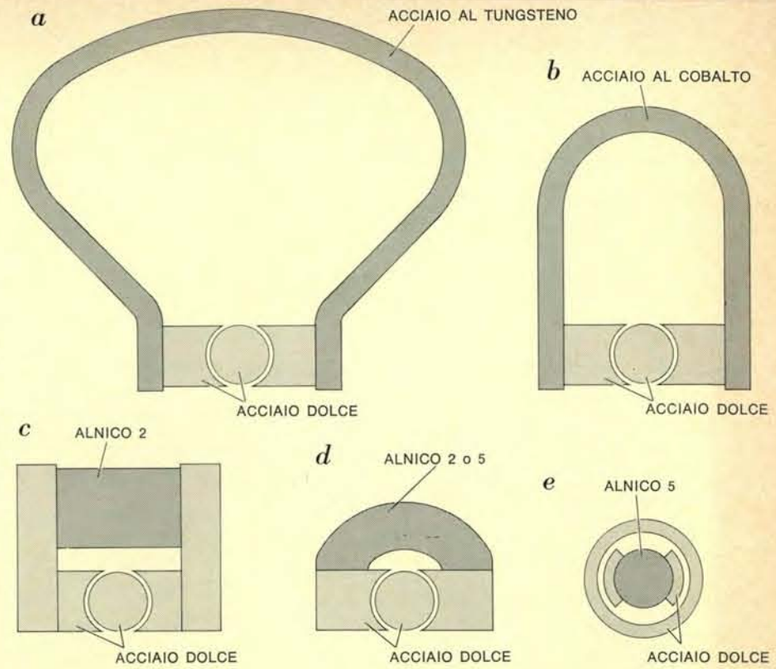
le stesso, purché sotto forma di particelle finemente suddivise, avrebbe potuto essere qualificato come un buon materiale magnetico duro e la sua forza coercitiva sarebbe stata limitata soltanto dal grado di anisotropia. Inoltre, ragioni teoriche spingevano a credere che le effettive dimensioni delle particelle avrebbero potuto essere sufficientemente grandi perché le si potesse ottenere semplicemente polverizzando il materiale. Questa linea di ragionamento guidò per parecchi anni la ricerca di materiali anisotropi tra i composti intermetallici di ferro, cobalto, manganese e nichel con una serie di elementi quali il boro, il fosforo, il germanio, il silicio, l'alluminio e lo stagno. Alcuni dei materiali scoperti erano interessanti ma non di particolare rilievo.

Nel 1966 Gary Hoffer e Karl Strnat dell'Air Force Materials Laboratory pubblicarono alcuni dati molto interessanti su un singolo cristallo di un composto intermetallico contenente cinque atomi di cobalto per ogni atomo di ittrio: il Co_5Y. Questo materiale è dotato di notevole magnetizzazione e la sua anisotropia è parecchie volte maggiore di quella delle altre sostanze esaminate in precedenza. La sua anisotropia infatti è tale che la sua resistenza alla smagnetizzazione è, presumibilmente, dell'ordine di 200 000 oersted e comunque piú di cento volte maggiore del valore caratteristico dei materiali di tipo Alnico.

Il meccanismo di risposta a un campo magnetico esterno è schematicamente illustrato per quattro tipi di sostanze magnetiche. Le frecce nere, a sinistra in ogni figura, indicano la direzione originaria della magnetizzazione. Quando viene applicato un campo di segno opposto, la direzione principale della magnetizzazione si inverte (*a destra*), come è mostrato dalle frecce colorate all'interno delle figure. L'intensità del campo applicato necessaria a compiere l'inversione è indicata dall'intensità del colore e dalla lunghezza delle frecce colorate contrassegnate con *H*. Nei magneti dolci a base di acciaio (*a*), i contorni di ogni dominio si spostano facilmente sotto l'azione di un campo magnetico debole. Le prime leghe dure (*b*) venivano sottoposte a trattamento termico e in seguito rapidamente raffreddate per tempra in modo da creare una complessa struttura interna che impediva lo spostamento dei contorni dei domini. Le ultime due figure (*c*, *d*) rappresentano un ingrandimento di singole particelle dei materiali piú recenti. Nelle leghe Alnico (*c*) le particelle sono troppo piccole perché possano esistere dei contorni di domini. La magnetizzazione può venire invertita soltanto per mezzo di campi sufficientemente intensi da far sí che essa ruoti in opposizione alle proprietà anisotrope del cristallo che favorirebbero la magnetizzazione nella direzione degli assi piú « docili ». Nei piú recenti materiali a cobalto-terre rare i contorni dei domini non sono normalmente presenti ma possono formarsi ed essere spostati sotto l'azione di campi molto intensi.

Tuttavia, i primi esperimenti eseguiti con quantità massicce di Co_5Y furono deludenti: non solo la preparazione del materiale presentava delle difficoltà, ma ogni tentativo di aumentarne le forza coercitiva, riducendolo con mezzi meccanici in piccole particelle, si rivelava inefficace. La forza coercitiva saliva a circa 2000 oersted e quindi prendeva a diminuire quando il materiale veniva ulteriormente polverizzato. Evidentemente la macinatura deformava la struttura del cristallo a tal punto da distruggerne l'anisotropia.

Durante la mia attività presso il General Electric Research and Development Center, ho svolto una ricerca sul Co_5Y e su composti similari in stretta collaborazione col gruppo della Air Force. Già da alcuni anni era noto che si potevano preparare dei composti analoghi al Co_5Y per sostituzione dell'ittrio con lantanio o altre terre rare. Nel 1967 annunciammo collettivamente che il composto cobalto-samario, Co_5Sm, sviluppava forze coercitive di gran lunga maggiori di quelle di ogni altro composto dello stesso gruppo e che, già in quella prima fase, sembrava promettere ottimi risultati.



I nuovi materiali magnetici piú potenti permettono di ottenere strumenti misuratori di tipo D'Arsonval sempre piú compatti. Negli strumenti qui illustrati, la corrente da misurare passa attraverso una bobina (*non rappresentata in figura*) che ruota nell'intercapedine tra i nuclei di acciaio dolce. Questa intercapedine è sede di un campo magnetico provocato dal magnete permanente. In quattro strumenti (*a*, *b*, *c*, *d*) il magnete è esterno rispetto ai nuclei di acciaio dolce. Nel quinto (*e*) il magnete è talmente piccolo che la disposizione dei componenti viene addirittura capovolta: lo spazio per la bobina infatti circonda in questo caso il magnete realizzato con i nuovi materiali.

Da allora il progresso è stato assai rapido grazie alle ricerche portate avanti in molti laboratori. D'altra parte la costruzione di buoni magneti comporta la soluzione di un certo numero di problemi di lavorazione che sono di fondamentale importanza. Infatti, dopo essere stato ridotto a una polvere di convenienti dimensioni, il materiale deve essere orientato per mezzo di un intenso campo magnetico in modo che gli assi di « facile magnetizzazione » di tutte le particelle risultino paralleli. Successivamente la polvere va ridotta in forma compatta e questa ultima e delicata fase può essere realizzata sia per mezzo di pressione meccanica, sia per sinterizzazione. Entrambe le tecniche hanno avuto buon esito.

I laboratori di ricerca della Philips in Olanda, la Raytheon Corporation e la General Electric negli USA hanno annunciato di aver realizzato con successo la produzione di magneti permanenti a cobalto-samario dotati di forza coercitiva intrinseca oscillante tra i 10 000 e i 30 000 oersted e aventi un massimo prodotto di energia compreso tra i 16 e i 20 milioni di gauss-oersted. Le forze coercitive cosí ottenute sono circa trenta volte maggiori di quelle raggiungibili con le leghe Alnico e i massimi prodotti di energia sono approssimativamente tre volte maggiori. Tutto ciò rappresenta un notevole progresso rispetto alla prima scoperta dell'anisotropia del Co_5Y avvenuta nel 1966.

D'altra parte, come era prevedibile, i nuovi materiali sono piuttosto costosi: il costo della materia prima necessaria a ottenere quantità da laboratorio di metallo puro per la costruzione di magneti permanenti a cobalto-samario è attualmente di circa 80 dollari al chilogrammo. Nonostante ciò, vi sono applicazioni in cui il costo elevato è piú che giustificato dalla qualità delle prestazioni dei nuovi magneti.

In realtà le terre rare non sono poi cosí rare; ciò che piú incide sul costo di preparazione è il processo di separazione dei vari metalli. Uno dei tentativi di ridurre il costo dei magneti a terre rare implica l'uso di una miscela di terre rare, detta « mischmetall », in luogo di elementi puri in combinazione con cobalto. Il mischmetall, che è appunto un miscuglio di terre rare ottenuto per riduzione dal minerale, è stato impiegato per molto tempo come disossidante nella fabbricazione dell'acciaio e, piú comunemente, nelle pietrine degli accendisigari. Sotto forma di miscuglio il costo delle terre rare è di pochi dollari al chilogrammo. A tutt'oggi, però, i tentativi di costruire dei buoni magneti con il mischmetall non hanno avuto buon esito.

Un'altra linea di ricerca, che può indirettamente portare a una riduzione dei costi, è stata quella di ottenere la microstruttura richiesta per via metallurgica anziché per via meccanica. È possibile, infatti, trattare una lega in modo da ottenere particelle della forma e delle dimensioni volute semplicemente facendole precipitare allo stato solido. In sostanza, questo è proprio il modo in cui si sono ottenute le leghe Alnico e altre leghe. I ricercatori dei Bell Telephone Laboratories negli USA e della Matsushita in Giappone hanno tentato di applicare questa tecnica ai magneti a cobalto-terre rare. Essi hanno scoperto che è possibile ottenere una struttura soddisfacente aggiungendo del rame a queste sostanze e usando un accurato procedimento termico ma non sono riusciti a produrre magneti con un massimo prodotto di energia molto superiore a dieci milioni di gauss-oersted (la metà del valore raggiungibile con cobalto-samario) a

causa della presenza di una certa quantità di rame non magnetico. D'altra parte il trattamento termico ha ugualmente fornito dei buoni risultati allorché il samario è stato sostituito dal cerio che è decisamente piú economico.

Appare chiaro che gli sviluppi futuri seguiranno due linee. La prima è quella di proseguire nella ricerca di materiali con prodotti di energia e forze coercitive sempre piú elevati da utilizzare in quelle applicazioni in cui il problema del costo passa in secondo piano ed è invece di primaria importanza che i magneti forniscano le massime prestazioni col minimo di ingombro e di peso. Sotto questo aspetto si spera di trovare dei materiali che abbiano un valore di saturazione magnetica ancora maggiore di quello del cobalto-samario e, infatti, la relazione originale sui materiali a cobalto-terre rare afferma che, da questo punto di vista, il cobalto-praseodimio è superiore al cobalto-samario. L'altra linea di ricerca è orientata verso l'elaborazione di materiali le cui prestazioni si avvicinino a quelle del cobalto-samario, purché a un costo notevolmente piú basso.

Non è ancora stata elaborata una soddisfacente teoria che stabilisca un rapporto preciso tra il processo di magnetizzazione dei materiali a base di terre rare e la loro composizione. Infatti non sappiamo perché il cobalto-samario permetta di costruire magneti permanenti di proprietà cosí superiori a quelle che si ottengono, per esempio, per mezzo del cobalto-praseodimio o del cobalto-cerio dal momento che, sotto il profilo delle proprietà chimiche, metallurgiche e magnetiche fondamentali, essi sono cosí simili.

La formazione di un contorno di un dominio magnetico in presenza di un campo magnetico negativo sembra costituire il fatto cruciale che determina il valore della forza coercitiva (*si veda la figura a pagina 64*). Gli sviluppi di questa ipotesi hanno contribuito ad approfondire la nostra conoscenza, sia teorica che sperimentale, di questi nuovi e particolari materiali. Nel nostro laboratorio, per esempio, abbiamo visto che, levigando la superficie delle particelle di cobalto-ittrio, è possibile aumentare di oltre trenta volte la loro forza coercitiva intrinseca (*si veda la figura in questa pagina*). Probabilmente questa levigatura elimina le irregolarità superficiali che faciliterebbero la formazione di domini di direzione opposta.

La levigatura delle particelle aumenta la forza coercitiva delle nuove sostanze a cobalto-samario. Le particelle irregolari della figura superiore hanno una forza coercitiva di 103 oersted mentre quelle della figura inferiore, levigate con un procedimento chimico, posseggono una forza coercitiva di 3340 oersted. In questa fotografia, eseguita nel laboratorio dell'autore, le particelle del materiale sono ingrandite a 600 diametri.

Come ho già accennato, i grandi motori elettrici a magneti permanenti costituiscono una delle applicazioni piú significative dei materiali ad alta forza coercitiva intrinseca. Quali altre applicazioni possiamo prevedere per il futuro? La resistenza alla smagnetizzazione è di estrema importanza, per esempio, negli amplificatori a microonde del tipo a onde progressive, largamente usati nelle telecomunicazioni e praticamente in tutti i campi delle comunicazioni via satellite. In amplificatori di questo tipo un fascio di elettroni viaggia attraverso un cilindro cavo costituito da alcune dozzine di magneti permanenti di forma toroidale. I magneti, in questo caso, hanno la funzione di focalizzare gli elettroni in un fascio molto sottile; essi vengono allineati in modo che i poli dello stesso segno risultino adiacenti (il polo nord vicino al nord del successivo e il polo sud vicino al sud del successivo): di conseguenza, ogni magnete tende a smagnetizzare i suoi vicini. Questa applicazione richiede delle caratteristiche talmente rigorose, che, per ottenere il prodotto di energia necessario e, nel contempo, alte forze coercitive, è stato spesso indispensabile ricorrere a leghe di cobalto-platino che costano migliaia di dollari al chilogrammo. In confronto, i magneti a cobalto-samario, non solo sono piú economici, ma hanno anche un massimo prodotto di energia doppio e sono cinque volte piú resistenti alla smagnetizzazione.

Il fatto che poli dello stesso segno si respingano è il principio su cui si basano molti apparati di sospensione praticamente privi di attrito. In molti contatori elettrici, per esempio, l'albero rotante viene tenuto sospeso per mezzo di un supporto magnetico perché ogni attrito nel contatore farebbe girare quest'ultimo troppo lentamente. I mutamenti nella forma degli apparecchi misuratori a bobina mobile, largamente usati per misure di corrente e di tensione, riflettono il fatto che, nel corso di questi ultimi decenni, è aumentato il valore del massimo prodotto di energia (*si veda l'illustrazione a pagina 65*).

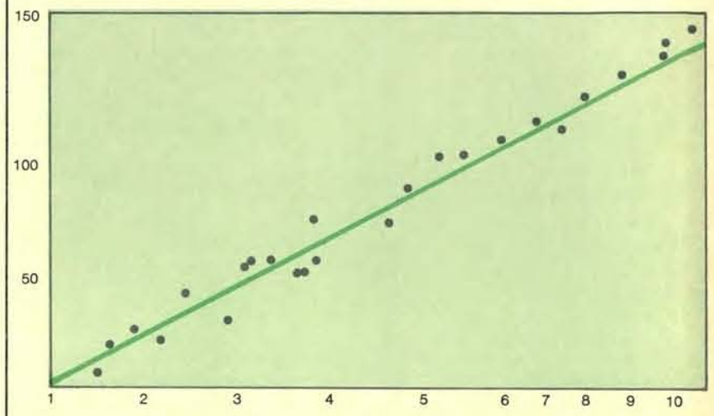
La proprietà dei magneti permanenti di poter sostenere grossi pesi senza alcun contatto fisico potrà un giorno essere utilizzata nei sistemi di sospensione dei convogli ferroviari ad alta velocità. Per quanto ciò possa sembrare fantastico, il fatto che i magneti permanenti posseggano la proprietà di non consumare energia, potrebbe permettere di ottenere sistemi a « sicurezza intrinseca » (*fail-safe*). Volendo sollevare un veicolo del peso di 10 tonnellate usando dei magneti a ferrite (che sono piú leggeri e molto piú potenti dei magneti Alnico) bisognerebbe disporre di due unità magnetiche, una posta sotto il veicolo e l'altra montata al suo interno, per un peso complessivo di circa 8000 chilogrammi. Usando un magnete a cobalto-samario il peso complessivo necessario per sollevare lo stesso veicolo sarebbe soltanto di 2000 chilogrammi. Naturalmente il calcolo è stato eseguito tenendo conto del fatto che l'unità magnetica posta sul veicolo deve essere sollevata insieme a questo; pertanto il magnete a ferrite dovrebbe sollevare un peso complessivo di 11 tonnellate mentre il cobalto-samario dovrebbe sollevare un peso di sole 10,25 tonnellate.

Questi calcoli non pretendono di fornire che una valutazione approssimativa. Sono oggi allo studio molti altri sistemi di sospensione per veicoli veloci. Questo sistema, tuttavia, rispetto a quello dei cuscinetti d'aria o ai sistemi elettrodinamici, ha il pregio di essere molto semplice. La sua realizzabilità dipenderebbe dalla possibilità di produrre alcune miglia di rotaie a magneti permanenti con costi di produzione non troppo superiori a quelli delle rotaie di acciaio. Ciò è quanto meno pensabile per i magneti a ferrite mentre è a mala pena concepibile per i magneti a cobalto-terre rare o per alcuni dei loro derivati. In ogni caso, le implicazioni derivanti da una richiesta di rotaie magnetiche repulsive provocano non poche perplessità all'industria di magneti permanenti.

servizio marketing

ETAS KOMPASS

ricerche di mercato per beni industriali



Siamo il **SERVIZIO MARKETING ETAS KOMPASS** *che da anni produce informazioni per il mondo imprenditoriale italiano.*

- *La nostra specializzazione sono le ricerche di mercato in tutti i settori dell'industria italiana.*
- *Per questo approfondiamo la ricerca fino ad individuare le caratteristiche e le funzioni aziendali dei managers che decidono o influenzano gli acquisti di beni industriali e strumentali.*

Possiamo esservi utili?
Scrivete al Direttore,

ETAS KOMPASS

SERVIZIO MARKETING
Piazza Gerusalemme, 5
Tel. 347051 Int. 295
20154 Milano

Analisi automatica delle cellule del sangue

Per evitare il laborioso esame microscopico dei globuli bianchi è stato messo a punto un sistema sperimentale basato su un calcolatore che identifica e conta i vari tipi di globuli e li descrive quantitativamente

di Marylou Ingram e Kendall Preston jr.

Ogni giorno negli ospedali degli Stati Uniti vengono praticati piú di un milione di esami di strisci di sangue. L'esame microscopico di routine del sangue, che attualmente è una indagine diffusissima nella pratica medica, è generalmente ritenuto uno dei segni piú utili delle condizioni di salute di un soggetto. Il suo valore sta nel fatto che la produzione da parte dell'organismo dei vari tipi di cellule del sangue risente notevolmente di stress generali, lesioni, malattie (infettive e non), avvelenamenti, radiazioni ionizzanti e altri stimoli nocivi. Aumentando la velocità della eliminazione o della produzione di specifici globuli bianchi, questi stimoli eccitano i tessuti emopoietici a modificare corrispondentemente il loro ritmo di produzione: il numero di un particolare tipo di leucociti diventa allora significativo. Inoltre, come può accadere in ogni catena di produzione, la variazione nella velocità di produzione delle cellule fa aumentare la probabilità che alcuni prodotti possano essere anormali. La forma dei leucociti tende a rispecchiare, spesso molto sensibilmente, le condizioni in cui sono stati prodotti. Perciò la conoscenza della morfologia può essere importante quanto la conta numerica dei vari tipi di cellule.

L'esame a vista delle cellule del sangue, nella pratica attuale, viene eseguito mediante un laborioso lavoro dell'uomo: medici o tecnici di laboratorio preparano ogni campione sotto forma di una sottile pellicola di sangue, lo colorano e lo esaminano al microscopio. Il metodo è dispendioso (il costo giornaliero degli esami praticati in tutti gli ospedali degli USA ammonta a parecchi milioni di dollari, oltre a centinaia di migliaia di ore lavorative) e spesso inesatto. In un recente studio condotto dal Center for Disease Control è stato trovato che, anche nella classificazione di routine di cellule sanguigne in campioni normali, il risultato era non soddisfacente nel 40 % dei laboratori studiati. I risultati erano ancora meno buoni quando i campioni di sangue presentavano alcune condizioni abnormi che sono presenti comunemente. Con l'aumento del lavoro nei laboratori piú frequentati, e il conseguente incarico di esecuzione degli esami a personale tecnico relativamente inesperto, è da attendersi che la percentuale di errore salga.

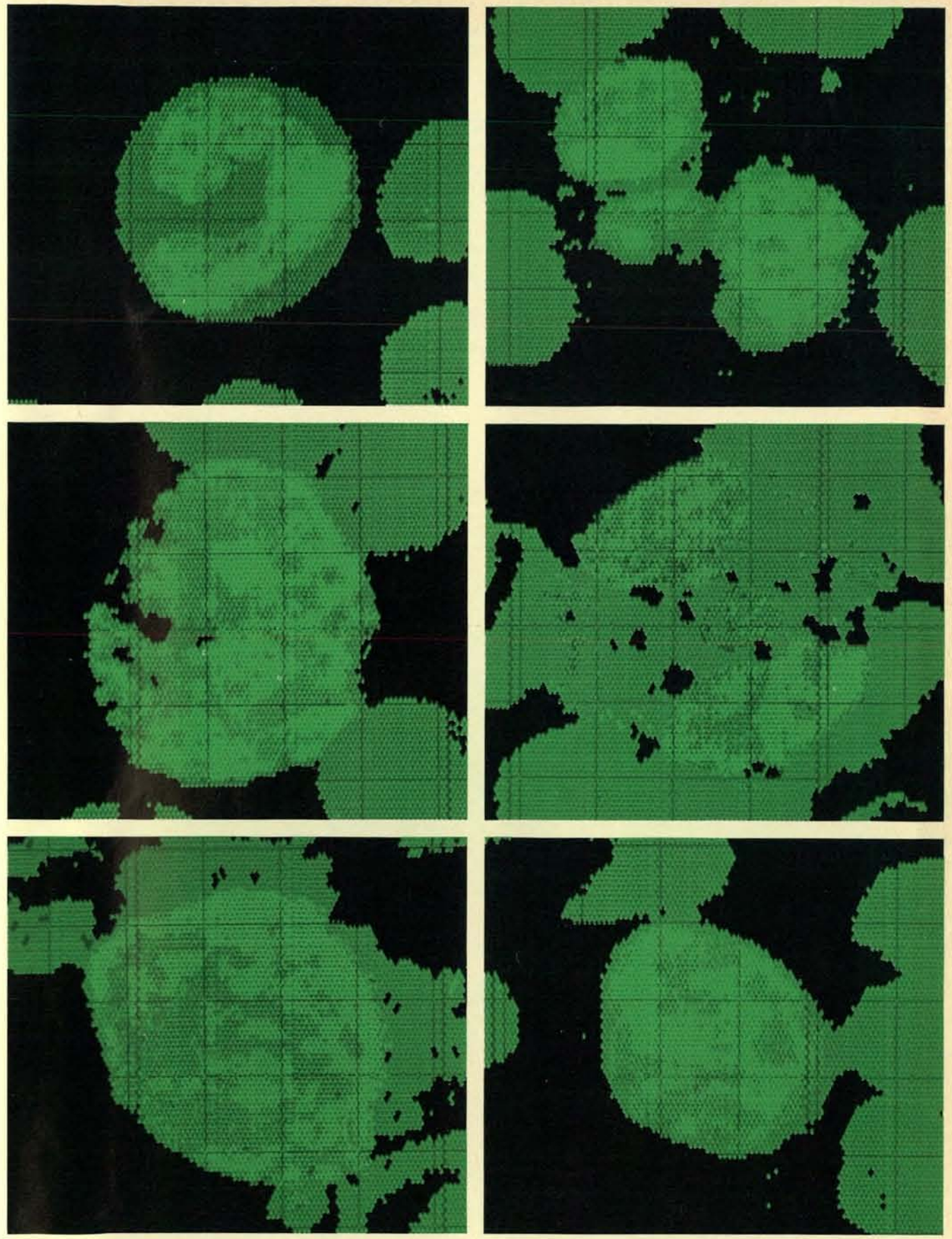
Inoltre, la richiesta di affidabilità e di accuratezza negli esami sta continuamente crescendo con l'aumento delle conoscenze sul significato di specifiche caratteristiche delle cellule del sangue.

La crescente difficoltà e il notevole costo dell'esame del sangue fanno pensare che sarebbe altamente auspicabile poter meccanizzare questa funzione. Un sistema efficace di analisi automatica potrebbe standardizzare il procedimento, migliorarne l'attendibilità, ridurre i costi e costituire un sistema abbastanza flessibile per tener conto di eventuali nuovi metodi, a mano a mano che si acquistano nuove conoscenze sulle cellule sanguigne. Ovviamente si tratta di un'impresa difficilissima. Non è facile costruire una macchina che possa competere in sensibilità e rapidità con quell'ammirevole sistema di riconoscimento delle immagini costituito dall'occhio e dal cervello dell'uomo. Però, dopo parecchi anni di studi e di esperimenti, abbiamo messo a punto un sistema per la registrazione e l'analisi di immagini di cellule sanguigne, sistema che è imperniato su un calcolatore e che ora si avvicina alle capacità di un tecnico di laboratorio.

La prima esigenza di un tale sistema era ovviamente quella di identificare le varie cellule sanguigne prodotte da tessuti emopoietici, quali il midollo osseo, la milza e i linfonodi. I semplici eritrociti (globuli rossi), che sintetizzano l'emoglobina e trasportano ossigeno e anidride carbonica, sono caratterizzati, tra l'altro, dall'assenza del nucleo. I leucociti (globuli bianchi) si suddividono in parecchie diverse classi. Vi sono i granulociti, che distruggono o inattivano i microbi o altro materiale estraneo mediante la fagocitosi a tale fine portano nel loro citoplasma miriadi di granuli contenenti enzimi e altre molecole biologicamente attive. A loro volta i granulociti si suddividono in tre sottoclassi, secondo le caratteristiche tintoriali: eosinofili (facilmente colorabili con l'eosina, sostanza rossa acida), basofili (colorabili con blu di metilene, colorante basico) e neutrofili (colorabili con entrambi i coloranti suddetti). Una seconda classe di leucociti fagocitanti è formata dai monociti, che hanno un nucleo irregolarmente ovale o a ferro di cavallo e granuli citoplasmatici differenti per dimensioni e contenuto da quelli presenti nei granulociti. Un'altra classe di globuli bianchi è costituita dai linfociti, cellule con citoplasma relativamente scarso e con un nucleo rotondo, i quali producono gli anticorpi e altri agenti che intervengono nelle risposte immunitarie dell'organismo. Infine, per completare l'elenco dei componenti cellulari del sangue, vi sono le piastrine, frammenti di citoplasma liberati da grosse cellule del midollo osseo, che agiscono come fattori della coagulazione del sangue.

Un sistema automatico per l'analisi delle cellule sanguigne non solo deve riconoscere e contare il numero relativo di questi vari globuli bianchi, ma deve dare anche informazioni quantitative sulla composizione della struttura cellulare, quali il grado di lobulazione del nucleo, la presenza di vari piccoli corpi cellulari e di variazioni nelle dimensioni e nella forma della cellula e dei suoi componenti.

Si può supporre che un compito di tale complessità dovrebbe richiedere un



Ecco come appaiono i globuli bianchi del sangue quando sono presentati sotto forma di «cartoni composti» che vengono formati da un calcolatore utilizzando le immagini microscopiche delle cellule. I cartoni presentano un nucleo denso (luminoso e strutturato) circondato da citoplasma e da parti di eritrociti. I leucociti che si vedono sono un neutrofilo non segmentato (*in alto a sinistra*), un neutrofilo segmentato (*in alto a destra*), un basofilo (*in mezzo a sinistra*), un eosinofilo (*in mezzo a destra*), un monocita (*in basso a sinistra*) e un linfocita (*in basso a destra*). I cartoni costituiscono l'entrata per l'analisi del calcolatore.

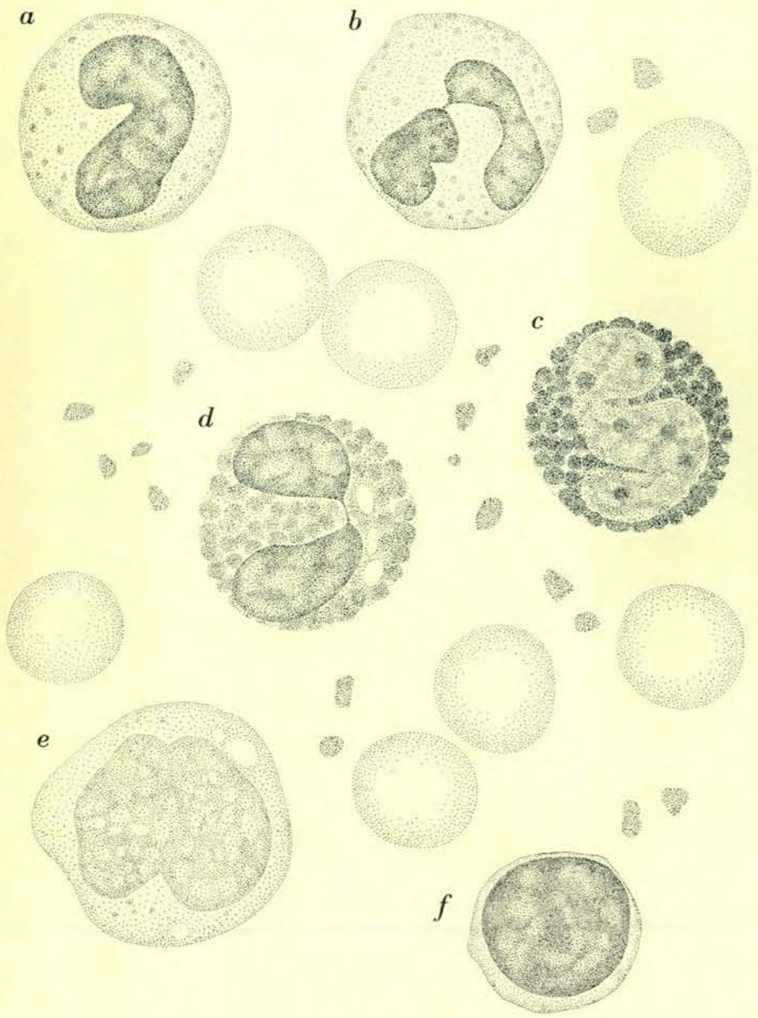
programma elaborato da un calcolatore di grandi dimensioni. Però l'elevato costo di un simile sistema lo fa escludere dall'impiego pratico. Abbiamo quindi deciso di affrontare il problema in modo piú semplice, adoperando un sistema basato su un calcolatore speciale impiegato direttamente nel compito basilare di studiare e analizzare le immagini. Uno dei vantaggi di questa soluzione è che tale sistema può operare a velocità che sono una-due volte maggiori di quelle di un calcolatore generico.

Il nostro primo progetto è stato un sistema noto come Cellscan (nome registrato della Perkin-Elmer Corporation). Per questo sistema avevamo messo a punto un microscopio ad alta risoluzione adoperando un vidicon, un normale tubo per riprese televisive. La parte anteriore del vidicon, dotata di una superficie fotosensibile, viene posta sul piano dell'immagine del microscopio, nel punto normalmente occupato dalla pellicola fotografica per la microfotografia. Il fascio elettronico che esplora questa superficie fotosensibile reagisce al livello di luce di ogni punto dell'immagine. Il campo di una immagine microscopica è un quadrato di 20 per 20 micron e il vidicon lo esplora punto per punto in 200 linee, convertendo l'immagine in un segnale elettronico video. Nel sistema Cellscan questo segnale è formato da 40 000 punti immagine.

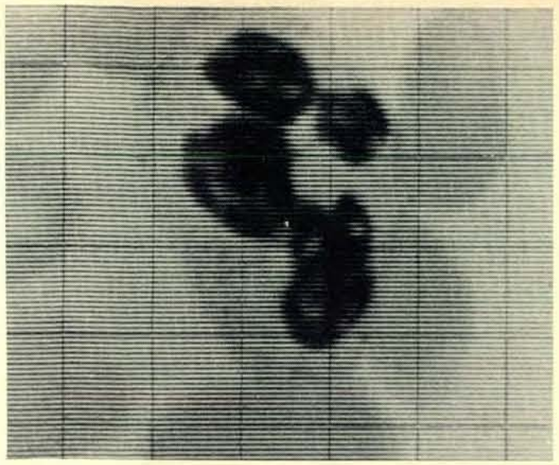
Il problema piú critico nella meccanizzazione dell'esame del piano dell'immagine è la trasposizione dell'immagine stessa in un linguaggio comprensibile al calcolatore. Poiché la velocità nello studio dell'immagine è essenziale, abbiamo ridotto il numero dei punti dell'immagine stessa mediante un procedimento di campionamento. Per la registrazione nel calcolatore il segnale video viene convertito elettronicamente in immagine in termini di numeri binari, il numero 0 rappresentando il bianco e l'1 il nero: quest'operazione l'abbiamo chiamata « quantizzazione » o « cartonizzazione » (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Un'altra operazione, detta « compressione », riduce di un fattore nove il numero dei punti campione effettivamente registrati dal calcolatore; se uno dei nove punti campione quantizzati in un quadrato di tre punti per tre è un binario 0, l'intero quadrato viene immagazzinato come 0 (bianco), e se tutti i nove punti sono binari 1, il valore dell'area viene registrato come 1 (nero). Questo espediente di campionamento fa sí che le aree « nere » isolate vengano ignorate e vengano invece immagazzinate dal calcolatore i dettagli « bianchi » piú luminosi dell'immagine binaria.

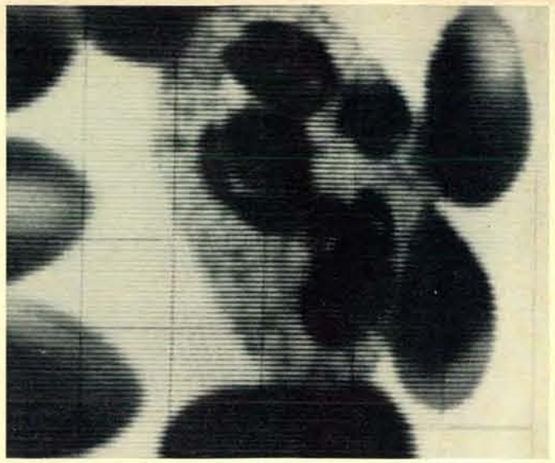
L'attendibilità del sistema deve dipendere in primo luogo dall'accuratezza e dalla consistenza dell'esplorazione fotometrica mediante il microscopio a televisione. Per la valutazione quantitativa di queste prestazioni adoperiamo due tecniche: una si basa sul giudizio della sua efficienza nel mostrare dettagli di vario grado di finezza (cioè varie densità spaziali dei punti immagine). Le prove hanno svelato che i segnali video riproducevano immagini di oggetti di un solo micron di diametro con un contrasto sostanzialmente pieno, ma che il contrasto non era altrettanto buono per oggetti del diametro di mezzo micron o ancora meno. (Il limite della risoluzione ottica del sistema è circa un quinto di micron).

L'altra misura che adoperiamo per la valutazione delle prestazioni è una tecnica di visualizzazione detta « contornografia ». Nel normale tubo per televisione il cannone elettronico applica il segnale video sotto forma di variazioni di intensità del fascio elettronico, producendo un quadro di emissione differenziale di luce dai punti del fosforo sulla superficie del tubo. Per la produzione di una contornografia, d'altra parte, il fascio di elettroni viene mantenuto costante e l'immagine, invece di essere formata mediante modulazioni del fascio, viene prodotta combinando

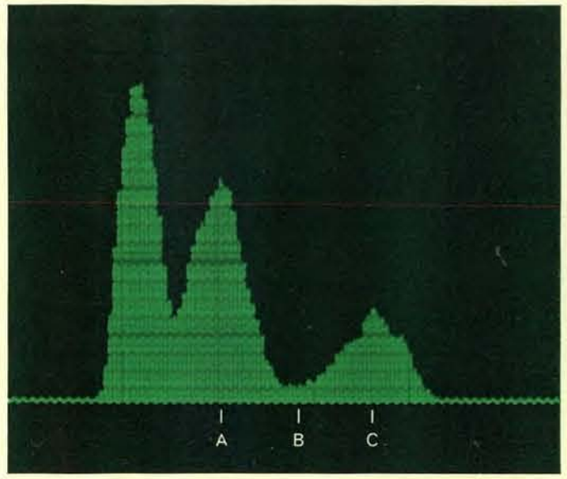


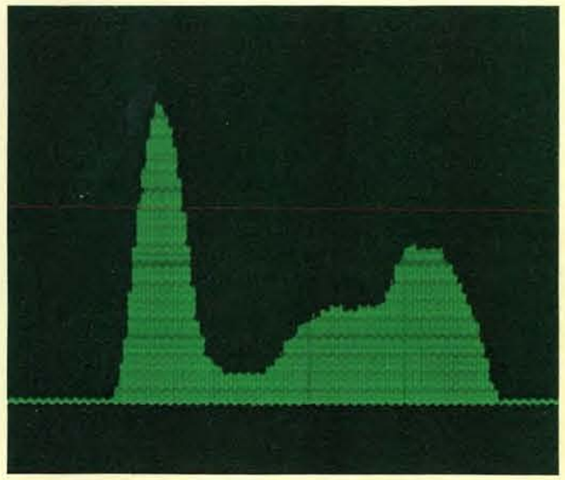
I tipi di cellule si distinguono per dimensioni, forma struttura e colore. Il colore è il meno importante: un tecnico di modesta esperienza identificherebbe immediatamente i sei tipi di leucociti sulla base di queste immagini schematiche in bianco e nero. I leucociti, presentati qui tra eritrociti e piccole piastrine, sono neutrofili non segmentati (*a*), neutrofili segmentati (*b*), basofili (*c*), eosinofili (*d*), monociti (*e*) e linfociti (*f*).



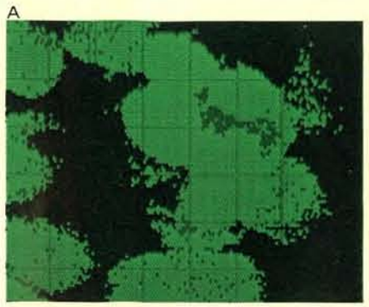


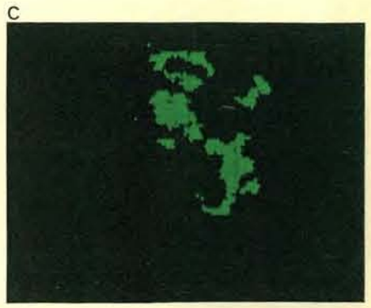
Lo schermo televisivo mostra una immagine non trattata di un neutrofilo e alcuni eritrociti illuminati con luce gialla (*a sinistra*). Le regioni scure sono il nucleo del leucocita, le piú chiare il suo citoplasma ed eritrociti. Quando si usa luce verde (*a destra*) un aumento nell'assorbimento rivela il carattere granuloso del citoplasma e rende notevolmente piú scuri gli eritrociti.





Istogrammi spettrofotometrici formati dal calcolatore mostrano la distribuzione di frequenza dei valori di densità ottica nelle immagini televisive in alto in questa pagina. (Negli istogrammi la densità diminuisce verso destra). I picchi dell'istogramma in luce gialla (*a sinistra*) rappresentano, da sinistra a destra, la densità dello sfondo, gli eritrociti e il nucleo. Il cambiamento piú notevole in luce verde (*a destra*) è un aumento di densità degli eritrociti, indicato dallo spostamento a destra del picco centrale.

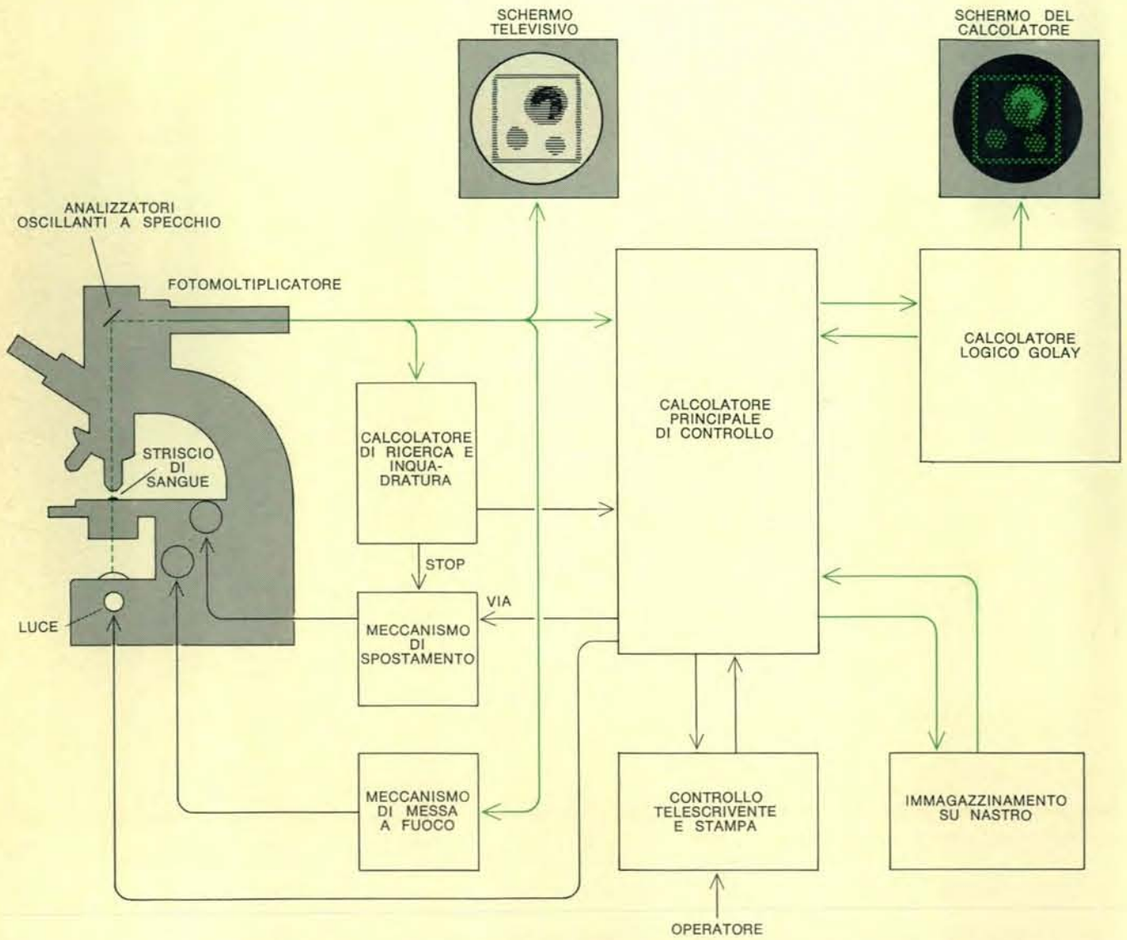




L'immagine quantizzata, o cartone, viene realizzata dal calcolatore. Questo sceglie tre livelli di densità ottica (*A, B e C nella figura al centro di questa pagina*), corrispondenti rispettivamente all'assorbimento medio dei globuli rossi, all'assorbimento nucleare minimo e a quello medio. Utilizzando questi livelli di quantizzazione per la trasformazione dei grigi dell'immagine televisiva in nero (binario 1) o in bianco (binario 0), il calcolatore realizza i tre cartoni corrispondenti, che sono illustrati in questa figura. Alla fine il calcolatore li sovrappone formando il cartone composto (*si veda la figura a pag. 69*).

segnali video e di scansione mediante l'impiego delle piastre di deflessione (*si veda la figura nella pagina a fronte in basso*). Quando abbiamo applicato questa tecnica per provare le prestazioni del microscopio Cellscan, per esempio nella riproduzione di un'immagine a lama di coltello posta di traverso nel punto centrale del campo, abbiamo trovato che l'immagine risultante era notevolmente offuscata da « rumori » provenienti da non uniformità nel fotoconduttore del vidicon (*si veda la figura a pag. 74 in alto*). Anche con un vidicon di fabbricazione recente, che come superficie fotosensibile dispone di una serie di diodi al silicio, l'errore fotometrico è del 5 per cento.

Abbiamo allora progettato di nuovo il sistema, sostituendo il vidicon con un dispositivo di scansione a specchio e adoperando un metodo di analisi dell'immagine sviluppato da Marcel J.E. Golay. Questo nuovo sistema di analisi delle cellule sanguigne è denominato Cellscan-Glopr (Glopr è un acrostico di Golay logic processor). Una coppia di specchi oscillanti ad angolo retto tra loro esplora l'immagine formata dal microscopio e trasmette i dati dell'esplorazione a un fototubo (*si veda la figura in alto nella pagina a fronte*). In ogni singolo istante il fototubo considera un unico punto dell'immagine, dato che la luce lo raggiunge attraverso un piccolo foro. La luce proveniente dal punto immagine riempie l'intera superficie del tubo e la sua superficie fotoemittente emette un fascio di elettroni che è proporzionale all'intensità della luce incidente. Il fascio viene raccolto e amplificato mediante una serie di elettrodi e l'amplificazione viene ottenuta moltiplicando gli elettroni, anche milioni di volte. Questa amplificazione è essenzialmente priva di rumore, e poiché il fascio elettronico, o segnale video, emesso dalla superficie fotoemittente deriva dall'intera area, eventuali non uniformità tra punto e punto della superficie non hanno alcuna conseguenza. In effetti, le contornografie di una lama eseguite con il microscopio Cellscan-Glopr sono molto piú accurate e costanti di quelle ottenute con il vidicon (*si veda la figura in basso a pagina 74*).



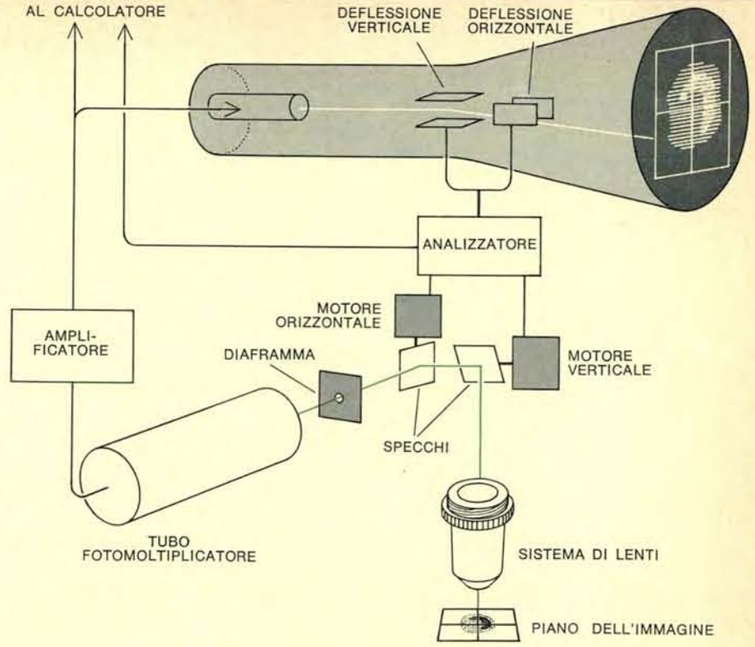
L'analisi automatica delle cellule del sangue viene effettuata dal sistema Cellscan-Glopr come indicato in questo diagramma schematico. Il vetrino con lo striscio di sangue viene mosso sotto le lenti dell'obiettivo da meccanismi automatici di spostamento e di messa a fuoco, che sono bloccati dal calcolatore di ricerca e inquadratura quando un leucocita viene a trovarsi nel campo dell'osservazione. La cellula viene analizzata e l'immagine, convertita da un fotomoltiplicatore in un segnale elettronico, può essere osservata su uno schermo televisivo o elaborata; viene allora quantizzata e « compressa » dal calcolatore di controllo per essere in seguito analizzata dal calcolatore logico Golay. L'immagine ricreata dal calcolatore può essere vista su uno schermo, immagazzinata nella memoria a nastro, identificata in base al tipo di cellula che rappresenta e conteggiata. L'intera operazione può essere diretta con una normale tastiera di telescrivente oppure effettuata automaticamente.

Il sistema di scansione a specchio, dato che dipende da specchi in movimento, è un po' piú lento del vidicon elettronico. Però crediamo che il sistema possa essere progettato in modo da far oscillare gli specchi a una velocità tale da fornire al calcolatore analizzatore di immagini le informazioni con la stessa rapidità con la quale il calcolatore può accettarle.

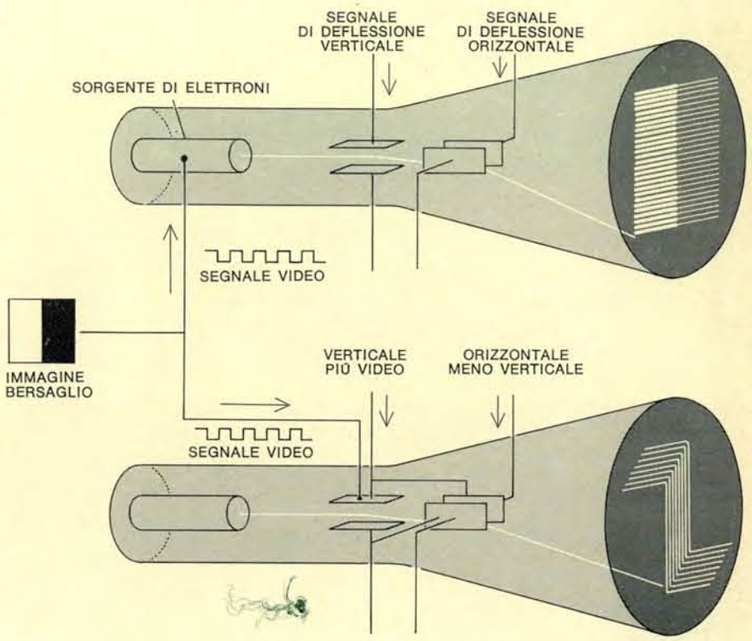
La traduzione da parte del calcolatore dell'immagine punto per punto delle cellule del sangue in « cartoni » procede quasi come nel sistema Cellscan. Il calcolatore forma anzitutto un istogramma fotometrico dell'intera immagine, mostrando la distribuzione di frequenza dei vari valori fotometrici per tutti i punti dell'immagine. L'istogramma è basato sulla illuminazione dell'oggetto per mezzo di una luce di colore selezionato. Come caratteristica principale, l'istogramma di un globulo bianco presenterà picchi piú elevati in corrispondenza dell'assorbimento della luce da parte dei nuclei cellulari, del citoplasma, dei globuli rossi circostanti e dello sfondo. In luce gialla, per esempio, il nucleo di un leucocita neutrofilo apparirà nero, mentre il suo citoplasma, ogni globulo rosso e il fondo resteranno chiari. In luce verde la struttura granulare del citoplasma di un neutrofilo si staglia nettamente perché i granuli assorbono la luce di tale lunghezza d'onda e anche i globuli rossi appaiono scuri per lo stesso motivo.

Formato un istogramma, il calcolatore lo esamina e istantaneamente seleziona i livelli di quantizzazione per il segnale video che dovrà essere adoperato per riprodurre l'immagine delle cellule e per identificarle. Esaminando una cellula tipica illuminata a luce gialla, il calcolatore sceglie livelli che rappresentano l'assorbimento medio da parte del nucleo dei leucociti, quello dei globuli rossi e un livello di assorbimento intermedio tra questi due valori. Sovrappone poi questi tre cartoni, o misure di densità, per formare cartoni composti che descrivono specifici leucociti (*si veda la figura a pag. 69*).

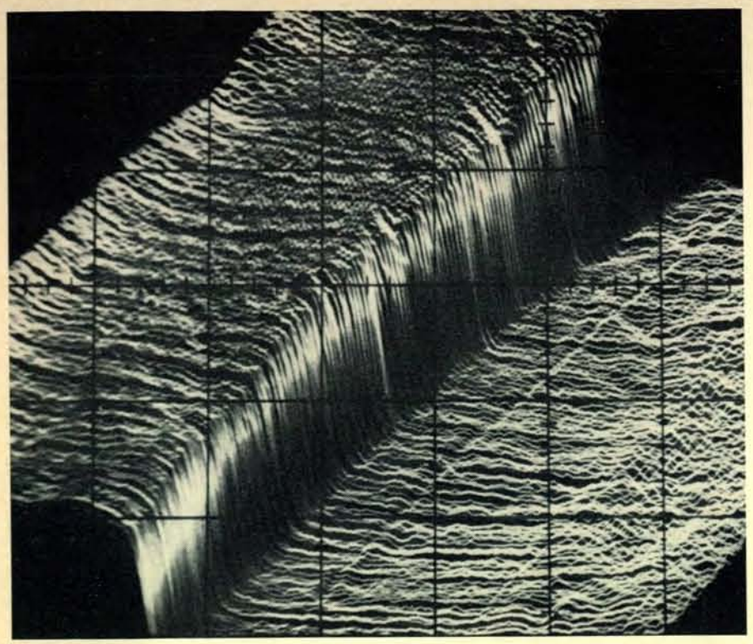
Il calcolatore passa ora a trattare l'informazione immagazzinata nei cartoni composti per definire e analizzare l'immagine di ogni globulo bianco visto al microscopio a televisione. Per questa analisi il sistema Cellscan-Glopr adopera « trasformazioni di configurazione » esagonali inventate da Golay. Il sistema esamina successivamente ogni punto immagine in termini di stati binari dei sei punti che lo circondano in



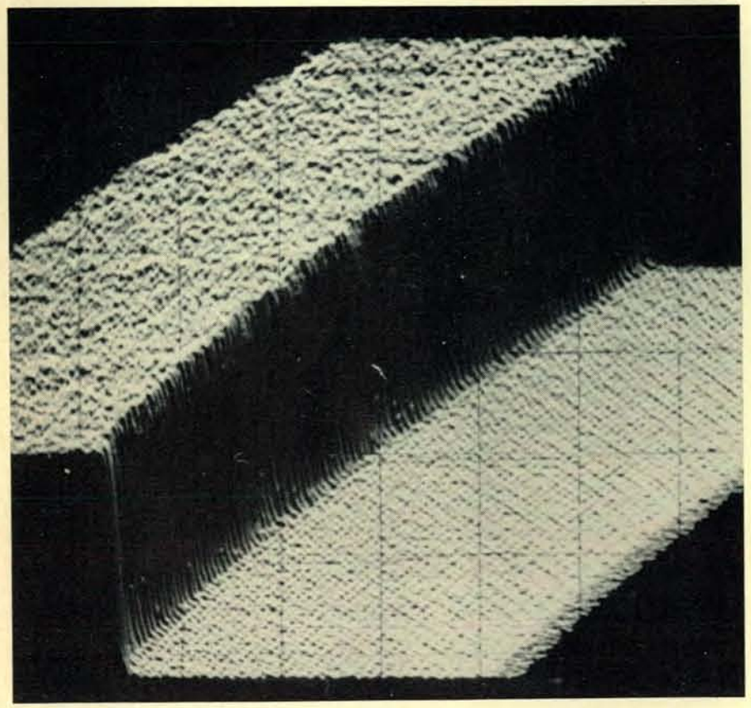
L'analizzatore a specchio oscillante esplora il piano dell'obiettivo del microscopio in senso orizzontale e verticale. La luce proveniente da un solo punto immagine per volta passa attraverso un'apertura sulla faccia di un tubo fotomoltiplicatore, dando una misura punto per punto della densità ottica. Il segnale elettronico che ne risulta viene amplificato per costruire un segnale video, che va al calcolatore o, come è mostrato nella figura, a uno schermo televisivo dove viene ricostruita l'immagine originale.



Il lavoro del sistema viene controllato mediante contornografia. Su un comune schermo televisivo (*in alto*) il segnale video (*onde di forma quadrata*) esplora regolarmente lo schermo. La modulazione del fascio di elettroni forma un insieme di luci e di ombre che riproduce l'immagine originale, in questo caso una lama di coltello posta verticalmente. Nella contornografia (*in basso*) le modulazioni luce-ombra vengono trasformate in deflessioni verticali, il che si ha sottraendo il segnale video da quello verticale. Le singole linee sono ottenute sottraendo il segnale verticale da quello orizzontale.



Contornografia di un'immagine a lama di coltello effettuata con il tubo vidicon, il tipo di analizzatore usato dagli autori nel sistema Cellscan originario. L'ondulazione delle linee e la loro variazione da una riga alla successiva rappresentando il «rumore» elettronico derivante dalla non-uniformità della superficie fotosensibile del vidicon.



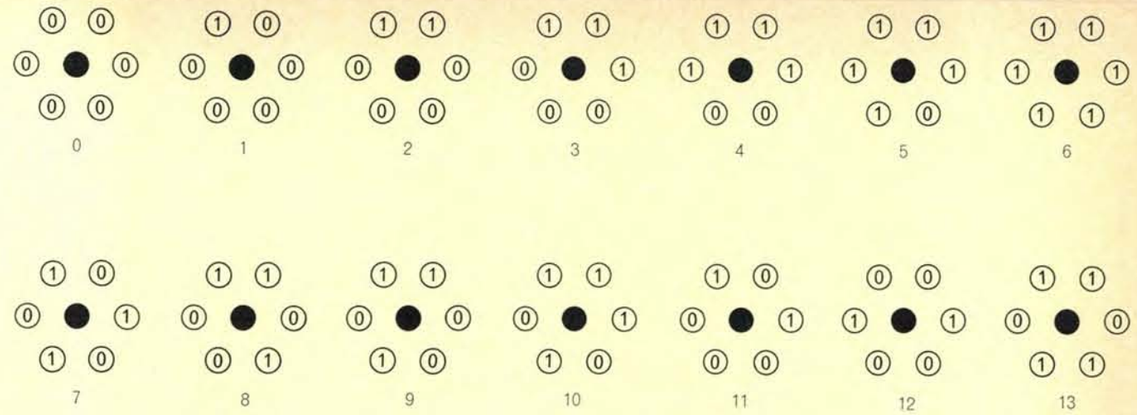
Il miglioramento nella precisione, ottenuto con l'analizzatore oscillante a specchio, è evidente in questa contornografia. La non uniformità della superficie fotosensibile non è piú un problema, come è evidente dalla regolarità delle linee orizzontali, anche se l'arrivo casuale di fotoni produce ancora dei disturbi particolarmente visibili nella regione illuminata. La risoluzione è migliorata, come si vede dal netto piano verticale.

disposizione esagonale, considerando le 14 configurazioni dei primi vicini (*si veda la figura a fronte in alto*). Successivamente il sistema ricalcola lo stato binario di ogni punto immagine sulla base dei suoi dintorni e della particolare trasformazione eseguita. Queste trasformazioni possono essere dirette a vari scopi specifici, come la misura dell'area totale del nucleo cellulare, il calcolo della lunghezza del suo perimetro, l'analisi e la misura della struttura fine, la scoperta di concavità che indicano lobi o irregolarità e il rilievo di molte altre caratteristiche topologiche. In tal modo il calcolatore perviene alla misura delle dimensioni della cellula, della sua forma, della sua struttura e di altre caratteristiche.

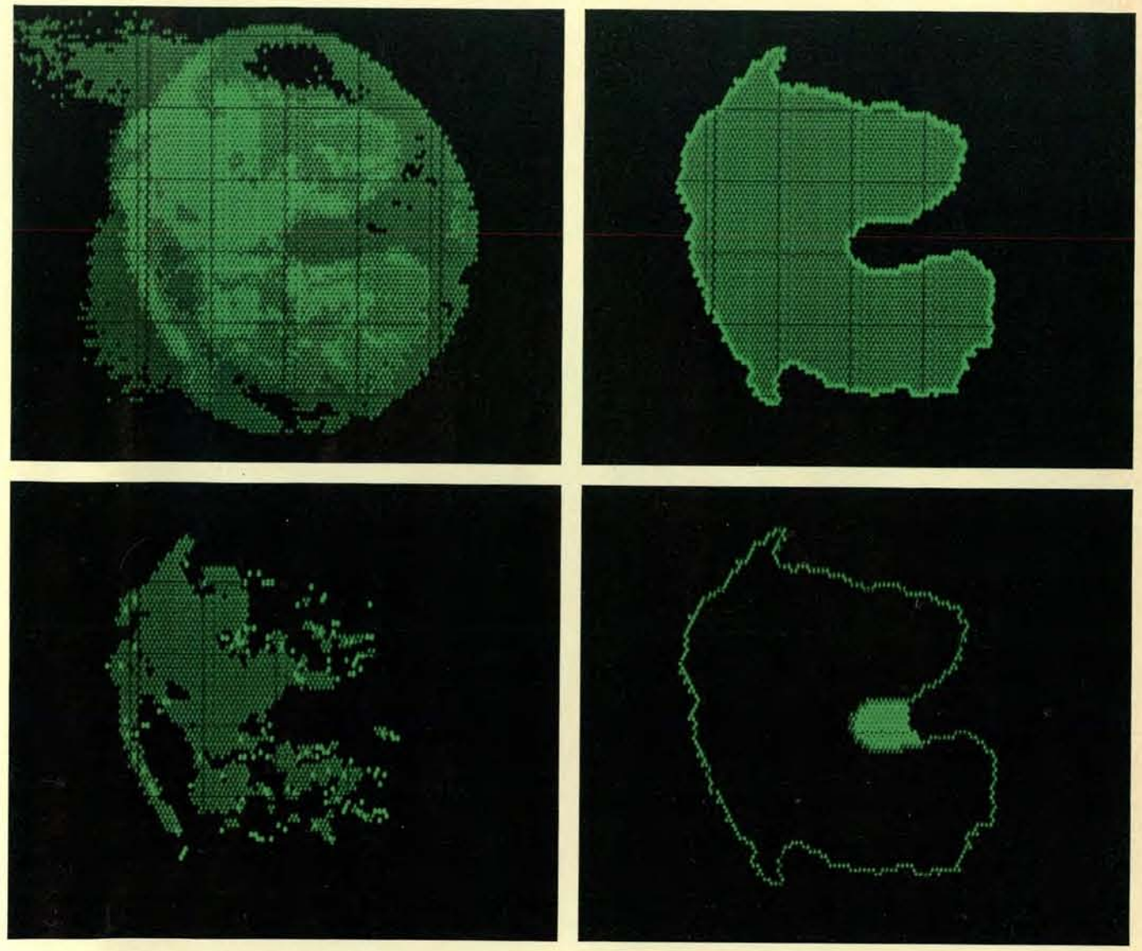
Tutto ciò viene compiuto molto rapidamente, quantunque la logica del calcolatore operi su un solo punto immagine alla volta. Il particolare calcolatore adottato esamina le immagini a velocità cento volte piú elevata di quella che può essere ottenuta con l'applicazione, a questo metodo di analisi delle immagini, dei normali calcolatori. Il nostro attuale sistema Cellscan-Glopr può analizzare un'immagine di 32×32 punti in 1,25 millisecondi, una immagine di 64×64 punti in 5 millisecondi e una di 128×128 punti in 20 millisecondi: il sistema esegue trasformazioni Golay anche molto complesse nel giro di pochi secondi.

Ottenuto un insieme di misure che descrivono l'aspetto di una cellula, la macchina viene a trovarsi finalmente di fronte al compito piú difficile: l'identificazione della cellula secondo il tipo. Abbiamo provato vari metodi per dare al calcolatore la capacità di prendere questa decisione e i migliori risultati li abbiamo ottenuti escogitando modelli che rappresentano gli insiemi di misure corrispondenti a specifiche classi cellulari mediante localizzazione in uno spazio multidimensionale (proprio come si localizza un punto, in un grafico a due dimensioni, misurandone la distanza lungo i due assi) e trovando poi i confini che separano tra loro le classi.

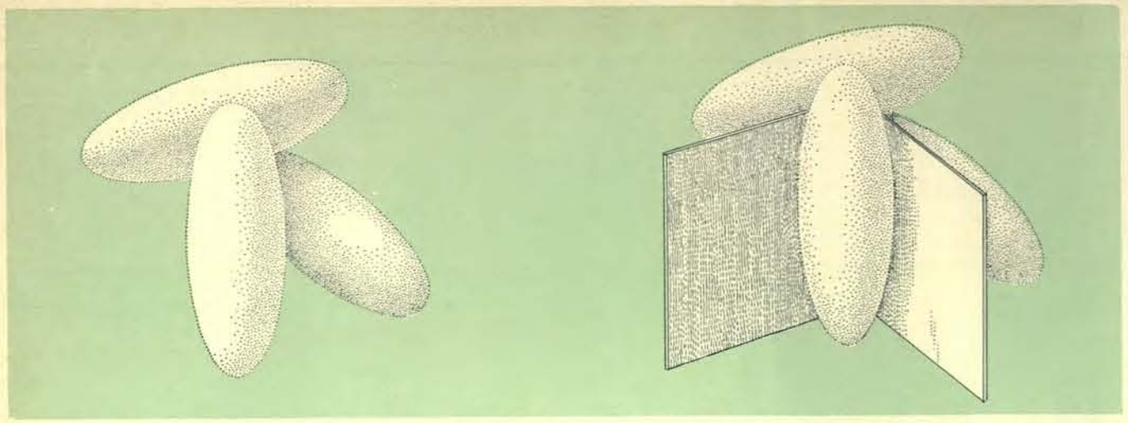
Quando si considerano differenti classi di leucociti e quando le posizioni delle singole cellule sono rappresentate in uno spazio di misura a tre dimensioni (cioè sulla base di tre misure di immagine per ogni cellula), gli insiemi di misure tendono da soli a configurarsi in raggruppamenti corrispondenti alle differenti classi. Supponiamo di esaminare un diagramma tridimensionale di questo tipo che mostri tre raggruppamenti. Se cerchiamo di trovare un piano che rappresenti un confi-



Le trasformazioni di configurazione esplorano ogni punto immagine in termini di stato binario (1 o 0, che stanno rispettivamente per nero o bianco) degli altri sei punti che si trovano piú vicini nel reticolo esagonale di punti immagine che costituisce il cartone. Vi sono 14 configurazioni possibili indipendenti dall'orientamento numerate da 0 a 13 per l'elaborazione.



Il cartone composto, come quello di un monocita (*in alto a sinistra*) costituisce l'ingresso nel calcolatore logico Golay, che opera analizzando un determinato singolo cartone. Per esempio, una semplice trasformazione che localizza i bordi corrispondenti ai margini identifica la periferia del nucleo (*in alto a destra*) e calcola la circonferenza e l'area del nucleo stesso. Un'altra trasformazione «restringe» gli elementi del cartone alla regione nucleare densa per determinare la struttura del nucleo (*in basso a sinistra*). Un'altra localizza la larga concavità del nucleo e la ravviva per lo schermo (*in basso a destra*).



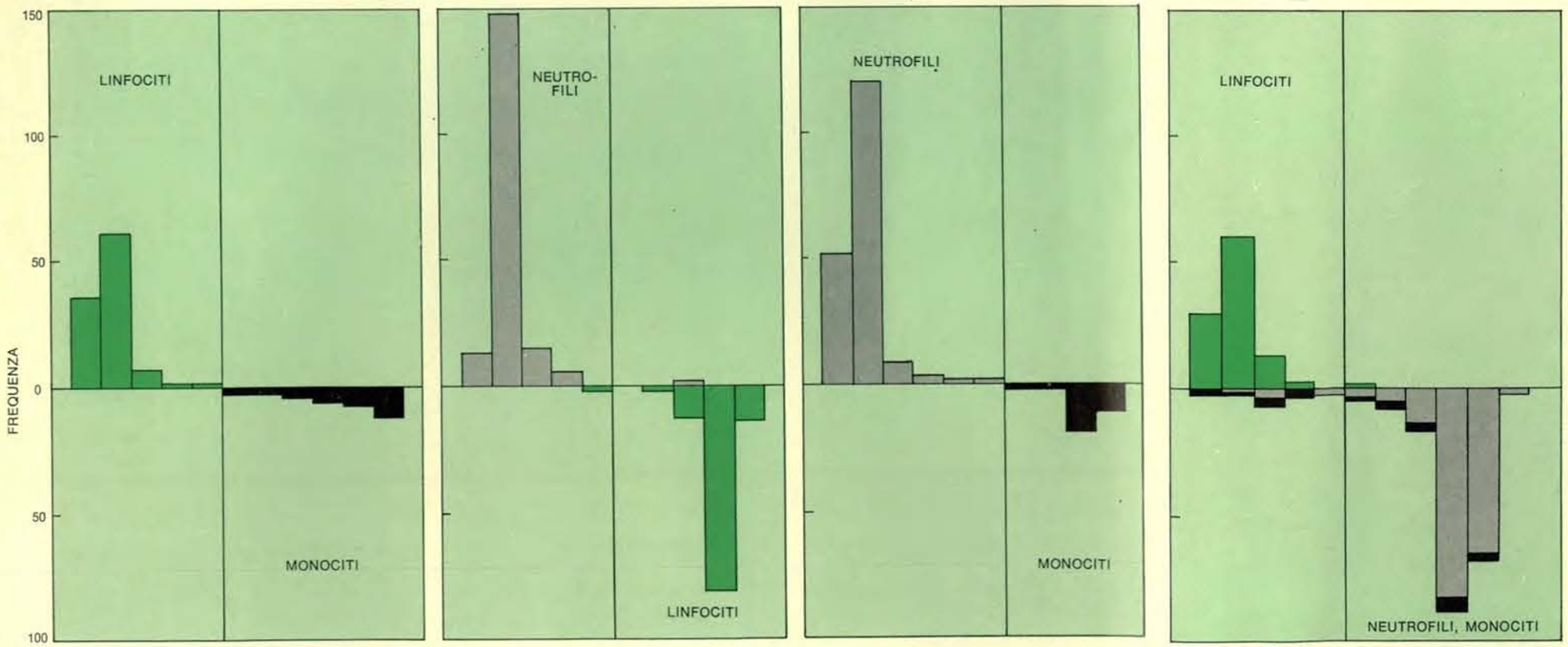
Le cellule sono identificate dal modo in cui varie misure caratteristiche di ogni tipo di cellule tendono a raggrupparsi. Quando sul cartone di ogni cellula vengono fatte tre misure, una cellula è individuata da un punto di uno spazio a tre dimensioni. Quando le misure sono effettuate su molte cellule le misure stesse tendono a raggrupparsi. La figura (*a sinistra*) mostra tre di questi raggruppamenti: il problema è di stabilire dei piani che li separino. Due piani sono necessari per poter separare misure corrispondenti a una particolare cellula dalle misure corrispondenti alle altre due classi di cellule (*a destra*).

ne tra le misure di una classe e quelle delle altre due, scopriamo che in genere nessun piano può realizzare questa separazione. Però, se prendiamo i raggruppamenti a due alla volta e disegnamo dei piani che separino i membri di ogni coppia tra di loro, lo spazio di misura può essere diviso in compartimenti, ognuno dei quali contiene solo gli appartenenti a un'unica classe (*si veda la figura qui sopra*).

Quando ogni globulo bianco viene descritto con piú di tre misure, ovviamente non è piú possibile rappresentare il problema della separazione con un semplice modello visivo. Siamo ricorsi a un differente tipo di modello, un istogramma di distanza. Vengono stabiliti dal calcolatore raggruppamenti di cellule, sulla base di un certo numero di misure, che in seguito costruisce anche i piani di separazione e misura la distanza di ogni cellula da ogni piano.

In un esperimento abbiamo analizzato in questo modo le immagini di campioni rappresentativi dei tre piú comuni tipi di leucociti umani: linfociti, neutrofili e monociti. Con un programma di calcolo basato sull'analisi statistica classica abbiamo anzitutto costruito il singolo piano che separerebbe in modo ottimale i linfociti dalle altre due classi. Questo tentativo di separazione non ebbe successo: le misure si sovrapponevano per cui nell'istogramma di distanza sei neutrofili e nove monociti andarono a finire nella parte del piano riservata ai linfociti e un linfocita si trovò dalla parte dei neutrofili e monociti. La separazione migliorò notevolmente quando i tipi di cellule furono divisi a coppie, con un piano che separava i linfociti dai monociti, un altro i neutrofili dai linfociti e un terzo i neutrofili dai monociti. Su un totale di 313 cellule esaminate, solo due (un linfocita e un neutrofilo) vennero a trovarsi dalla parte sbagliata del piano (*si veda la figura in basso in queste due pagine*).

La separazione a coppie di tre classi di cellule richiede la costruzione da parte del calcolatore di tre piani di separazione; quattro classi richiedono sei piani; cinque classi 10 piani e cosí via. Il sistema Cellscan-Glopr è attualmente programmato per effettuare separa-



Per valutare la separazione dei raggruppamenti in uno spazio a piú dimensioni (misure) possono essere adoperati, se necessario, istogrammi di distanza. L'altezza di ogni sbarretta indica il numero di insiemi di misure, ognuna corrispondente a una sola cellula, che viene a cadere in un dato intervallo di distanza (*asse orizzontale*) da un piano di separazione. Il miglior metodo è quello di usare un piano di separazione per ogni coppia di classi di cellule, come nei primi tre istogrammi. Questa separazione si riferisce a 107 linfociti (*in colore*), 179 neutrofili (*in grigio*) e 27 monociti (*in nero*). Solo due cellule sono state separate erroneamente, come mostra il disegno al centro. Quando si impiega solamente un piano, l'errore di separazione viene compiuto per sei neutrofili, nove monociti e un linfocita.

Disponibile il raccoglitore per il volume V di **LE SCIENZE**

edizione italiana di **SCIENTIFIC AMERICAN**

agosto 1970 - dicembre 1970

Il V raccoglitore di LE SCIENZE corrispondente al Vol. V conterrà i cinque fascicoli

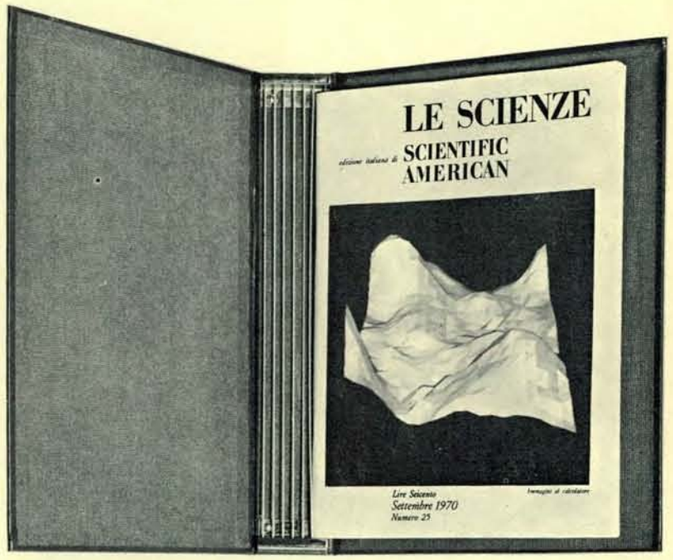
da agosto a dicembre 1970 e relativi indici.

Sono ancora disponibili i raccoglitori precedenti, cioè:

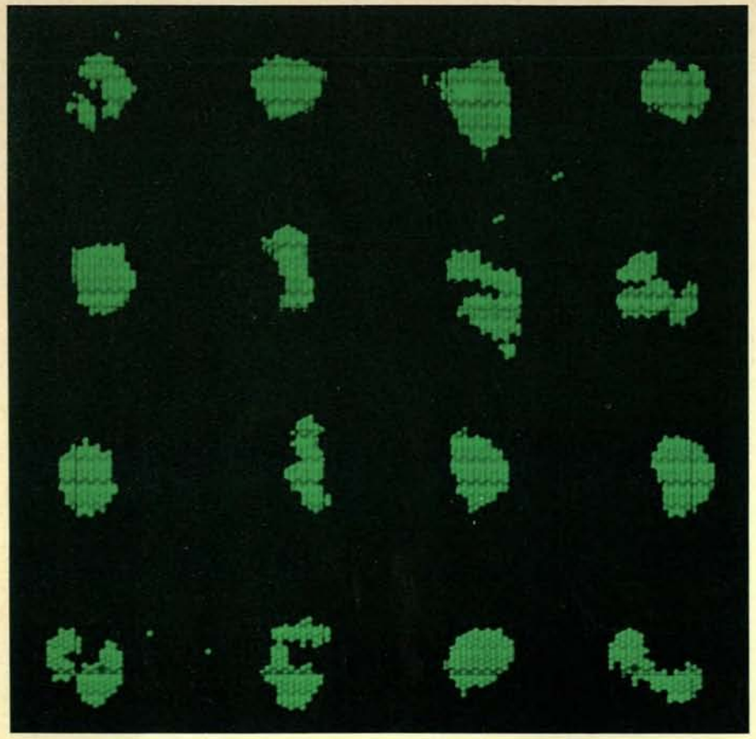
- **per il I volume** (Settembre 1968 - Febbraio 1969)
- **per il II volume** (Marzo 1969 - Agosto 1969)
- **per il III volume** (Settembre 1969 - Febbraio 1970)
- **per il IV volume** (Marzo 1970 - Luglio 1970)

Prezzo di ciascun volume: L. 1.700 (1.400 + 300 spese)

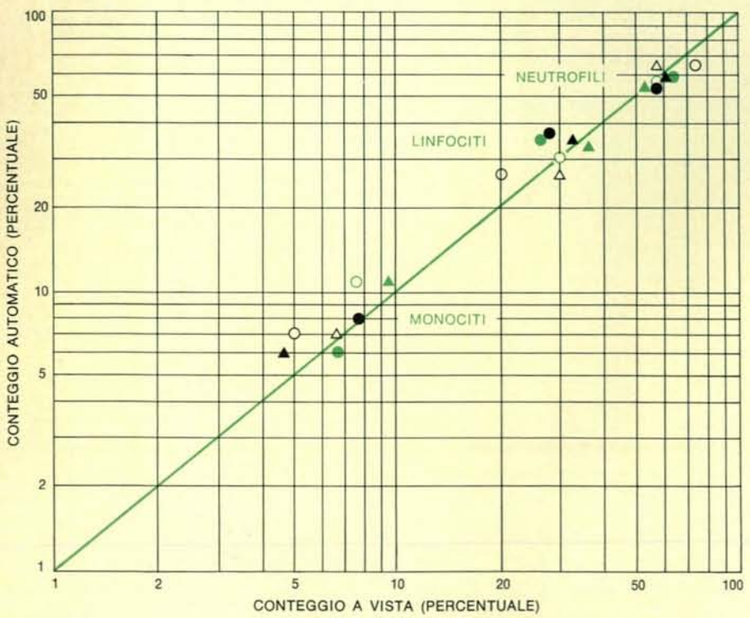
Per fare i vostri ordini usate l'apposita cartolina allegata a questo fascicolo. Vi preghiamo di unire alla richiesta dei raccoglitori il relativo importo; i raccoglitori verranno infatti inviati a domicilio solo dietro pagamento anticipato.



LE SCIENZE S.p.A.
Ufficio Circolazione - Largo Quinto Alpini, 2 - 20145 Milano



La variabilità tra cellule all'interno di una classe può essere quasi altrettanto grande quanto le differenze tra classi, il che complica il problema di classificazione. Questo montaggio realizzato dal calcolatore mostra cartoni di nuclei di linfociti e di neutrofili. I primi hanno forma quasi circolare, i secondi appaiono un poco piú irregolari.



La precisione del processo automatico si sovrappone bene a quella di tecnici di laboratorio, come è dimostrato da questo diagramma che riporta i risultati di sette strisci di sangue, ognuno rappresentato da un simbolo differente. La media dei conteggi riportata da ognuno dei parecchi tecnici di laboratorio è disposta lungo la scala orizzontale, a un'altezza della scala verticale corrispondente a quella del conteggio automatico. (I punti che vanno a cadere sulla diagonale indicano ovviamente concordanza esatta).

zioni a coppie per almeno otto tipi di cellule, e questa selettività esige 28 piani. Se tutte le cellule di ogni classe seguissero fedelmente un modello stereotipo, la separazione delle classi sarebbe molto netta. In realtà però i leucociti di una classe differiscono notevolmente nella forma; questa variabilità è grande quasi quanto le differenze tra classi (*si veda la figura qui accanto*). Nel mettere a punto programmi di calcolo per la separazione ottimale e per controllarne le prestazioni, abbiamo posto particolare attenzione al problema della variabilità, applicando sempre il nostro test a campioni che presentavano un'area realistica di variabilità.

Finora ci siamo dedicati soprattutto all'analisi di campioni di sangue prelevati da soggetti normali. Il nostro attuale sistema Cellscan-Glopr può operare automaticamente senza controllo per lungo tempo, fino a un'intera nottata. Di recente l'abbiamo provato in una serie di esami durati per parecchie notti senza controlli. In ogni serie la macchina esaminava un singolo striscio di sangue normale, passando in rassegna da 200 000 a 400 000 cellule, allo scopo di localizzare e analizzare da 200 a 400 leucociti, col preciso intento di classificare i linfociti, i granulociti e i monociti. In numerosi esami il sistema ha localizzato circa 5000 oggetti che considerava leucociti: ogni oggetto era misurato, analizzato nella struttura e infine identificato dalla macchina come linfocita, granulocita, monocita o DK (*Don't Know, imprecisato*). Tutti gli strisci furono esaminati a vista da quattro esperti tecnici del Norwalk Hospital del Connecticut. Il conteggio differenziale del numero relativo di globuli bianchi per ogni classe, fatto dalla macchina, corrispondeva esattamente agli esami eseguiti dai tecnici (*si veda la figura qui accanto*). Oltre a classificare le cellule, in questi esami la macchina ha misurato e tabulato parecchi dettagli della struttura di ogni cellula, quali dimensioni, colore medio e lunghezza, grado di intensità e numero dei lobi del nucleo.

I nostri esperimenti con il sistema Cellscan-Glopr hanno dimostrato che esso può essere programmato per svolgere numerosi compiti oltre a quelli della conta differenziale dei leucociti. Col tempo ne esploreremo le capacità in varie funzioni, come il conteggio dei grani nelle emulsioni di autoradiografie di cellule, la localizzazione di parassiti malarici negli eritrociti, l'analisi di cromosomi umani, l'identificazione e il conteggio di reticolociti e altri esami noiosi da eseguire, ma importanti nella pratica medica o nella ricerca.

Il significato delle faune insulari quaternarie

Il confronto tra le faune continentali e le faune insulari del Quaternario dimostra che alcune isole sono state temporaneamente collegate ai continenti; i collegamenti sono avvenuti in tempi diversi per ciascuna isola

di Augusto Azzaroli

La leggenda dei Ciclopi, i giganti dall'unico occhio in fronte che abitavano le grotte della costa orientale della Sicilia, è frutto di pura fantasia, o non è piuttosto ispirata a qualche fatto reale?

Grotte riempite di resti di mammiferi del periodo Quaternario sono comuni in tutta Italia e anche fuori del nostro paese, ma quelle della Sicilia hanno caratteri particolari. Alcune grotte sono estremamente ricche di fossili, ma nessuna grotta del continente sembra averne fornito nella quantità spropositata che si è trovata in alcune grotte della Sicilia. Il paleontologo francese J. De Christol, in uno scritto che risale al 1834, riferisce un episodio significativo. Le raffinerie di zucchero francesi si trovarono in necessità di una forte quantità di carbone animale; qualche commerciante siciliano dotato di iniziativa quanto di immaginazione pensò di sfruttare le ossa fossili della grotta di San Ciro presso Palermo, e in sei mesi di scavo ne estrasse 44 q, che spedí a Marsiglia. Per buona fortuna dei naturalisti le ossa, ormai fossilizzate, risultarono inservibili per le raffinerie e lo sfruttamento commerciale cessò. L'episodio della grotta di San Ciro può essere annoverato tra i piú gravi misfatti negli annali della paleontologia, ma è quanto mai istruttivo come documento dell'incredibile ricchezza di alcuni giacimenti.

Tra i fossili quaternari della Sicilia figurano al primo posto, per numero, gli elefanti e gli ippopotami, seguiti dai cervi, meno abbondanti, e da pochi altri mammiferi. Come composizione la fauna siciliana è diversa da quelle del continente, piú ricche di specie; ma anche i suoi componenti (elefanti, ippopotami, cervi ecc.) risultano diversi dalle specie che vivevano nella penisola. Piú precisamente, tutti i grandi mammiferi dell'isola hanno statura ridotta, sono divenuti, chi piú chi meno, nani. L'ippopotamo ha una statura di circa 1,20 m alla spalla e una lunghezza totale di poco piú di due metri e mezzo. Negli elefanti il nanismo è andato molto piú in là: nella maggior parte dei casi la statura è un po' al di sotto dei due metri e può scendere fino al metro e mezzo, ma vi sono anche elefanti piccolissimi, nei quali il maschio adulto raggiungeva appena novanta centimetri alla spalla.

La presenza di questa fauna specializzata pone una serie di interrogativi in cui problemi di zoologia si intrecciano intimamente a problemi di geologia. Quando sono vissuti questi animali nani, come sono arrivati nell'isola e quando vi si sono estinti? Quali sono stati i loro rapporti con le faune del continente? Infine: *perché* tutto questo?

Diciamo subito che la fauna a mammiferi nani è vissuta nel Pleistocene, il periodo piú antico del Quaternario. Un tempo si riteneva che il Pleistocene avesse una durata piuttosto breve: tra 600 000 e un milione di anni, ma oggi si propende ad attribuirgli una durata piú lunga. Secondo alcuni avrebbe avuto inizio 1 800 000 anni fa, secondo altri, tra cui anche chi scrive, circa 2 700 000 anni fa. La sua fine si colloca a circa 9000 anni a.C.: da allora ha inizio il secondo periodo del Quaternario, l'Olocene.

Quando i colonizzatori Greci raggiunsero la Sicilia e iniziarono a civilizzarla, i mammiferi nani erano già scomparsi da molto, ma ne rimanevano i resti nelle grotte, spesso facilmente accessibili. I resti di elefanti dovettero attirare, piú degli altri, l'attenzione, e da questi nacquero le leggende dei Ciclopi. Le ossa degli arti potevano facilmente essere prese per ossa di « giganti »; nel cranio, l'ampio foro delle narici in mezzo alla fronte fu scambiato per un'orbita, tanto piú che le orbite vere, che negli elefanti sono largamente aperte ai lati e comunicano con la fossa temporale, passarono facilmente inosservate. Le leggende dei giganti persistettero a lungo. Boccaccio riferiva di avere visto due denti e alcune ossa di « gigante » in una chiesa di Trapani: e ancora nel 1830 Bivona Bernardi doveva impegnarsi in una serie di articoli sui giornali di Palermo per demolire, sulla base dei recenti lavori di Giorgio Cuvier, le vecchie idee dure a morire.

Lasciando da parte le favole, cercheremo di inquadrare il problema su basi piú naturalistiche. Abbiamo iniziato a parlare della Sicilia perché in quest'isola i resti di faune nane sono particolarmente abbondanti e sono noti da lungo tempo: ma il caso non è unico nel suo genere. Faune fossili a mammiferi nani sono state trovate in grotte, brecce ossifere o in altri depositi in tutte le isole maggiori del Mediterraneo: nelle Baleari, in Corsica, in Sardegna, a Creta, a Cipro. Se ne sono trovate anche in isole minori: nel Tirreno, a Capri e Pianosa; tra la Sicilia e l'Africa, a Malta; nell'Egeo, a Delos, Naxos e Serifos, ed è possibile che il numero dei ritrovamenti sia destinato ad accrescersi con nuove scoperte. Fuori del Mediterraneo faune a mammiferi nani sono state trovate a Giava, Celébes, Flores, Timor, e nel Madagascar. La presenza dei mammiferi nani nelle isole non è una circostanza fortuita, ma vi è un legame di causa ed effetto tra insularità e nanismo.

Secondo punto: il fenomeno del nanismo, ha interessato soltanto i mammiferi di grandi o, in qualche caso, di medie dimensioni, ma non ha influenzato quelli piccoli, i rettili e gli uccelli. Al contrario, tra questi animali si sono verificati talvolta casi di gigantismo. In Sicilia e a Malta è vissuto un ghiro che raggiungeva dimensioni doppie dei ghiri attuali; a Malta si sono trovati anche resti di una tartaruga gigante. Nel Madagascar, accanto a ippopotami nani sono vissuti, fino a epoca recentissima, grandi lemuri terragnoli e uccelli giganteschi, incapaci di volare.

Dobbiamo anche affrontare una questione di capitale importanza. È noto che i piú antichi mammiferi erano animali di statura modesta o decisamente piccola: tutti gli animali di grande statura hanno acquistato questo carattere nel corso dell'evoluzione, con un aumento progressivo di dimensioni. In generale una grande statura è un carattere adattativo, perché consente una maggiore possibilità di difesa dagli aggressori o una maggiore velocità nella fuga. Negli animali predatori l'aumento di statura rende possibile la caccia di prede piú grosse: ma per questi animali la quantità di cibo è necessariamente limitata in confronto a quella degli erbivori, e questo pone un limite alle loro dimensioni corporee. Ma non per tutti gli animali una grande statura sarebbe vantaggiosa: per esempio i toporagni, le talpe, i topi trovano nelle piccole dimensioni la loro migliore difesa, la possibilità di nascondersi negli anfratti del terreno, di scavarsi ripari, di raccogliere il nutrimento. In questi animali, nel corso dell'evoluzione, non si è avuto aumento di statura, anche se si sono perfezionati i vari organi del corpo.

Nel caso dei mammiferi nani insulari dobbiamo chiarire questo interrogativo: si tratta di animali discesi da antenati di grandi dimensioni e che sono divenuti nani nelle isole, o di relitti di animali primitivi, che per un qualsiasi motivo non hanno ancora portato a termine la loro evoluzione verso una grande statura? La seconda alternativa ha trovato talvolta dei sostenitori, ma non regge alla critica. Nei continenti troviamo qualche caso di specie rimaste primitive e di piccola statura. Un caso molto noto è quello del piccolo ippopotamo della Liberia, *Choeropsis liberiensis*. Vari caratteri mostrano che questo è davvero un animale rimasto indietro nell'evoluzione e che non è mai divenuto grande: ma si tratta di un ramo evolutivo che si è staccato molto tempo fa dagli altri ippopotami africani. Gli ippopotami nani della Sicilia non hanno alcuna parentela con l'ippopotamo liberiano, ma sono strettamente imparentati con *Hippopotamus amphibius*, il grande ippopotamo largamente diffuso in Africa, e che nel Pleistocene raggiunse anche l'Europa, spingendosi fino all'Inghilterra meridionale. Per varie ragioni di carattere geologico, non vi è alcun dubbio che gli ippopotami sono arrivati in Sicilia passando per l'Italia peninsulare; e in Italia gli ippopotami sono arrivati verso la fine del Pleistocene inferiore, con forme già evolute, di grande statura, identici, salvo forse qualche particolare di secondaria importanza, alla specie africana attuale; e nel nostro territorio sono persistiti fino al Pleistocene superiore. È quindi certo che gli ippopotami sono diventati nani dopo essere penetrati nell'isola, e dopo che questa si è staccata dalla Calabria. Altrettanto è avvenuto per gli elefanti, i cervi e gli altri mammiferi nani.

In qualche caso la riduzione della statura ha prodotto degli effetti curiosi. Per esempio, è noto che i molari degli elefanti sono formati da numerose lamelle di dentina e di smalto, avvolte e tenute assieme da cemento. Negli elefanti piú antichi e piú primitivi queste lamelle sono grosse e poco numerose, nei piú evoluti sono molto numerose e strettamente serrate tra loro. Negli elefanti nani col ridursi della statura è avvenuto che anche i denti si sono rimpicciolíti: le lamelle dentali non si sono rimpicciolite in proporzione ma si sono ridotte di numero. Questo ha fatto pensare a qualcuno che non si trattasse di elefanti divenuti nani, ma di specie primitive: ma si tratta di un'apparenza ingannevole. Nel cranio e negli arti i piccoli elefanti nani non mostrano alcuna primitività; e d'altra parte i piú antichi elefanti, derivati da un ceppo di mastodonti africani nel Pliocene, erano già animali di grande statura.

Che le specie nane siano effettivamente degenerate nella statura appare con estrema chiarezza nei cervi. Questi animali perdono i loro palchi ramificati tutti gli anni, e li riformano in breve tempo. Vi è per ciascuna specie una certa relazione tra lo sviluppo complessivo dei palchi e la mole corporea: in individui di grande statura i palchi sono piú grandi e piú ramificati che negli individui di statura inferiore. Nei cervi nani insulari i palchi si sono ridotti in maniera molto appariscente, molto piú, in proporzione, di quanto si sia ridotta la statura, e presentano spesso anomalie e veri fenomeni di degenerazione. E vi sono casi in cui gli steli ossei del frontale sui quali si impiantano i palchi sono rimasti grossi, come nei cervi del continente: e a questi grossi steli fanno seguito dei piccoli palchi dall'asta sproporzionatamente esile. Tuttavia non in tutti i cervi è avvenuto un fatto del genere: ciascuna specie ha il suo proprio modo di reagire al fenomeno del nanismo.

Col ridursi della statura le proporzioni del corpo si alterano. In genere le gambe diventano corte, come nei pony; la testa è un po' grossa, ma con muso raccorciato e sottile. Vi sono però delle eccezioni: infatti, i paleontologi olandesi G.J. Boekschouten e P.Y. Sondaar ritengono che l'ippopotamo nano di Creta, *Hippopotamus creutzbergi*, avesse zampe relativamente lunghe, e interpretano questo fatto come un adattamento ai terreni accidentati dell'isola. I denti possono diventare meno complicati, come è avvenuto appunto in alcuni elefanti e ippopotami: ma in genere, pur riducendosi di dimensioni, rimangono relativamente grandi, sproporzionati alla mole del cranio.

Concludendo, molte isole – nel caso del Mediterraneo possiamo dire tutte le isole nelle quali si conoscono faune fossili del Quaternario – sono state popolate da grandi mammiferi che vi sono degenerati, diventando nani. Come è avvenuto questo, e soprattutto, lo ripetiamo perché? Un semplice sguardo alle faune: elefanti, cervi e altri ungulati, carnivori, scimmie, oltre ai già ricordati ippopotami, ci fa capire che questi animali non sono arrivati nelle isole a nuoto. Una spiegazione del genere non vale neppure per gli ippopotami, che essendo erbivori non si avventurano mai in alto mare, dove non potrebbero trovare cibo. È chiaro del resto che gli ippopotami nani non hanno mai attraversato neppure lo stretto di Messina. I grandi mammiferi terrestri sono penetrati nelle isole in tempi in cui queste furono collegate ai continenti, e in seguito vi sono rimasti isolati e sono diventati nani. Al geologo si presentano a questo punto due domande, che è bene tenere distinte. La prima è: di che età sono i fossili trovati nelle grotte e nelle brecce ossifere? Dal punto di vista geologico, la domanda ha scarso interesse. La seconda domanda è molto piú importante: quando è avvenuto il collegamento tra isole e continenti, e quando il successivo distacco? Vi è stato un solo collegamento o ve ne sono stati piú d'uno?

In Sardegna conosciamo pochi resti di mammiferi terrestri dell'Eocene medio e del Miocene medio-inferiore: vi sono stati in questi periodi collegamenti col continente, verosimilmente attraverso la Corsica e la Provenza (sembra che il massiccio Sardo-Corso si sia spostato alquanto rispetto all'Europa continentale nel corso del Terziario), ma queste faune piú antiche non presentano alcun carattere di nanismo, e per quanto ne sappiamo non hanno lasciato discendenza. Secondo lo zoologo B. Baccetti, alcuni insetti ipogei tuttora viventi sarebbero i relitti del collegamento avvenuto tra queste isole e il continente nel Miocene inferiore; altri relit-

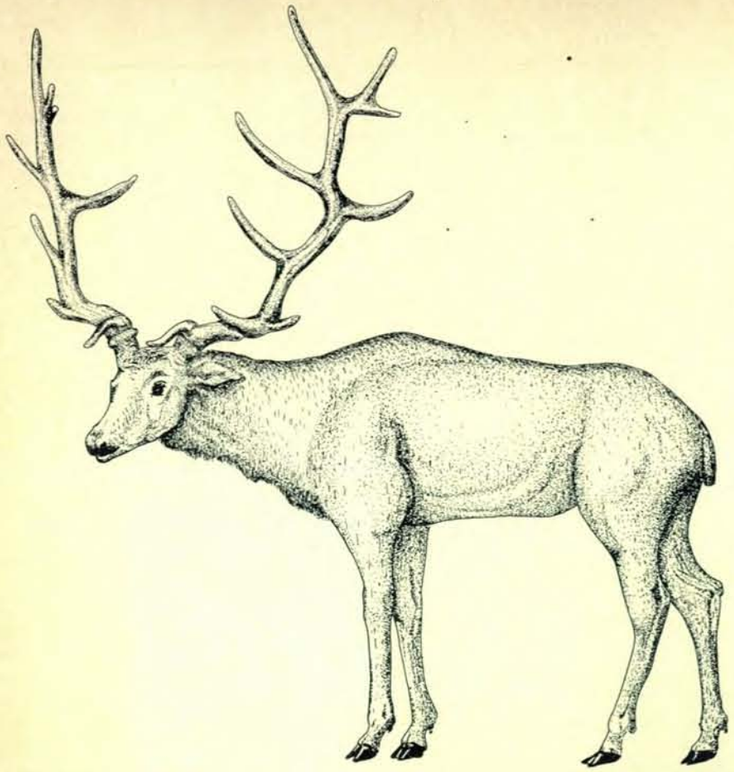
ti (rettili, anfibi e invertebrati) testimonierebbero di un terzo collegamento avvenuto nel Miocene superiore, ma di questo non si è ancora trovato traccia tra i fossili terrestri; allo stesso modo non sappiamo nulla della fauna terrestre sarda del Pliocene. In Sicilia conosciamo una fauna di mammiferi terrestri del Miocene superiore, ma anche questa sembra che si sia estinta senza lasciare discendenza. Le faune insulari appartengono al Pleistocene superiore e in qualche caso al Pleistocene medio, e sono chiaramente discese da faune che popolarono il continente in tempi diversi del Terziario superiore e del Quaternario. Questo ci fornisce una base per inquadrare il nostro problema nell'ambiente paleogeografico. Alla fine del Terziario il bacino del Mediterraneo aveva raggiunto piú o meno la conformazione attuale; continuava però un'attività abbastanza intensa di movimenti tellurici, che si manifestano ancora oggi nei frequenti terremoti. In qualche caso questi movimenti dovettero influenzare notevolmente i rapporti tra isole e terraferma: ma a questi si sovrappose anche una serie di fenomeni di portata piú generale. È noto che nel corso del Pleistocene il clima subí forti oscillazioni, con punte di freddo durante le quali i ghiacciai si estesero enormemente. Durante le fasi glaciali i continenti boreali e i maggiori gruppi montuosi si coprirono di estese calotte di ghiaccio; l'estensione totale dei ghiacci oltrepassò i 50 milioni di km², oltre il triplo della loro estensione attuale, con una superficie pari a circa un terzo delle terre emerse. Poiché le calotte ebbero uno spessore di qualche migliaio di metri, una forte quantità di acqua fu sottratta alla normale circolazione e il livello del mare scese notevolmente. A complicare ulteriormente le cose, i periodi freddi furono intervallati da periodi caldi durante i quali i ghiacci si fusero e il mare salí a livelli anche piú alti di quelli di oggi. La storia del Pleistocene è cosí caratterizzata da una serie di oscillazioni del livello marino; sembra che vi siano state sei o sette oscillazioni maggiori, di cui almeno le ultime tre presentano, a loro volta, un rapido susseguirsi di oscillazioni minori. Il dislivello marino tra i massimi e i minimi dovette aggirarsi sui 100-150 m; nell'ultima oscillazione negativa il livello del mare, scese un po' sotto i – 130 m. Per di piú, pur attraverso questo succedersi di oscillazioni, sembra che il livello medio del mare sia calato nel corso del Pleistocene, e in misura notevole, qualcosa come 160 metri: il che potrebbe essere dovuto ad un approfondirsi dei bacini oceanici, o secondo alcuni a un sensibile aumento del raggio terrestre.

Oscillazioni del mare e movimenti tellurici sono i due fattori che hanno fatto variare i collegamenti delle isole tra loro e coi continenti durante il Quaternario. Dato che l'ampiezza delle oscillazioni marine è nota, almeno entro certi limiti, una buona conoscenza della topografia sottomarina potrebbe permettere di ricostruire la topografia delle terre emerse nei vari periodi del Pleistocene: ma i movimenti tellurici introducono un elemento imprevedibile e non misurabile. Per ricostruire la storia passata delle isole dobbiamo ricorrere a confronti tra le loro faune terrestri e quelle dei continenti.

All'inizio del Pleistocene le faune terrestri europee erano del tutto diverse da quelle attuali, e nel complesso ancora simili a quelle plioceniche. Le faune del periodo compreso tra il Pliocene superiore e il Pleistocene inferiore sono chiamate in Europa faune Villafranchiane, dal paese di Villafranca d'Asti in Piemonte, una località particolarmente ricca di vertebrati. Il periodo Villafranchiano occupa un intervallo di tempo piuttosto lungo, a cavallo tra il Pliocene superiore e il Pleistocene; la sua durata è certamente superiore ai due milioni di anni e probabilmente poco inferiore ai tre milioni di anni. La fine del Villafranchiano non è ancora stata datata direttamente ma sembra collocarsi, con larga approssimazione, intorno a un milione di anni fa.

In questo lungo intervallo di tempo si sono succedute faune diverse, ma la loro composizione complessiva non ha subito forti rivoluzioni. I mammiferi sono rappresentati da specie estinte, molte delle quali sono piú o meno stretta-

Migrazioni delle faune dal continente alle isole durante Terziario e Quaternario nel bacino del Mediterraneo; le frecce ne indicano le presunte vie e i numeri l'età: 1, migrazioni avvenute tra il Miocene superiore e il Pliocene inferiore; 2, migrazioni tra la fine del Pleistocene inferiore (Villafranchiano) e l'inizio del Pleistocene medio (Cromeriano); 3, migrazioni avvenute all'incirca durante la glaciazione di Mindel; 4, migrazioni avvenute durante la glaciazione di Riss; 5, migrazioni durante la glaciazione di Würm. Con tratto marcato è indicata l'isobata di — 130 m, corrispondente alla massima depressione del livello marino durante il Quaternario e che delimita quindi terre che furono certamente emerse; la maggior parte delle isole è però separata dal continente da fondali piú profondi; ciò è indizio sicuro di movimenti tellurici verificatisi nel Pleistocene.



Ricostruzione del cervo gigante *Megaceros* (*Megaceroides*) *verticornis dendrocerus*, vissuto in Europa durante il Cromeriano e la successiva glaciazione di Mindel. L'animale misurava circa 1,50 m al garrese. La ricostruzione è basata su esemplari di varie località della Germania, della Toscana e dei dintorni di Roma. La forma tipica *M. verticornis verticornis* viveva in Inghilterra e aveva palchi meno ramificati e largamente palmati nella parte superiore. È il progenitore dei cervi nani di varie isole del Mediterraneo. Alcuni suoi discendenti sono migrati, in qualche momento imprecisato del Pleistocene, in Marocco e in Algeria, dove sono sopravvissuti fino al Pleistocene superiore.

mente imparentate con mammiferi che vivono oggi nelle regioni calde dell'Asia. Attraverso i pollini delle piante, conservate nei sedimenti argillosi e torbosi, è stato possibile ricostruire le vicissitudini della vegetazione e del clima. Si è visto cosí che durante il Villafranchiano vi sono state tre fasi di clima freddo, di cui la prima segnerebbe il limite tra Pliocene e Pleistocene. Non si conoscono in Europa tracce glaciali collegate a queste prime oscillazioni fredde: si conoscono però tracce di glaciazioni molto antiche, di età compresa tra 3,1 e 2,6 milioni di anni, in Islanda, in California e nella Nuova Zelanda; per di piú, una fauna villafranchiana della Francia meridionale, contemporanea o poco successiva al primo periodo freddo, è risultata dell'età di 2,5 milioni di anni. Vi è quindi motivo di pensare che l'inizio del Quaternario risalga a circa 3 milioni di anni fa. Altri autori invece, seguendo un ragionamento del tutto diverso dal nostro, ammettono una data molto piú recente, prossima a 1,8 milioni di anni fa.

Una quarta oscillazione fredda, anche questa messa in evidenza dai pollini e da qualche traccia di suolo gelato, segna la fine della fauna villafranchiana, che per la maggior parte si estinse senza lasciare discendenza. È curioso che, per quanto piú tardi si trovino tracce molto evidenti di periodi freddi maggiori, durante i quali l'Europa centrale e settentrionale fu coperta da un'enorme calotta di ghiaccio, la maggiore rivoluzione faunistica del Pleistocene europeo coincise con la fase fredda che chiuse il Villafranchiano, e che ha lasciato, nel complesso, tracce molto meno evidenti dei periodi freddi successivi.

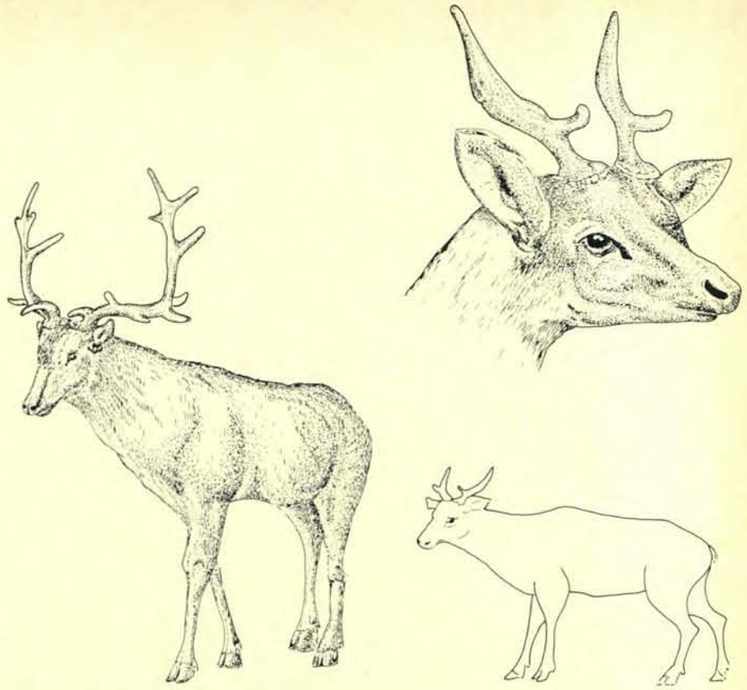
Al Villafranchiano seguí un periodo caldo di durata piuttosto breve, il Cromeriano degli autori inglesi, e quindi tre evidenti glaciazioni, chiamate Mindel, Riss e Würm, separate da periodi interglaciali caldi. Sappiamo anche che queste glaciazioni interessarono tutta la Terra, comprese le montagne delle regioni equatoriali, e anche le regioni polari.

Possiamo fermarci per il momento a questo punto e passare all'esame delle faune della Corsica e della Sardegna, che sono state lungamente unite nel Pleistocene e per quanto ci interessa possono essere considerate come un'unica isola. L'elemento faunistico piú comune è costituito dai cervi, i quali però non sono imparentati con i cervi di oggi ma con una specie estinta, di grande statura, con palchi enormi e riccamente ramificati, *Megaceros verticornis dendrocerus*. Questa specie immigrò nell'Europa occidentale, venendo evidentemente dall'Europa orientale o dall'Asia, all'inizio del Cromeriano, e vi si mantenne fino al periodo glaciale di Mindel, dopo di che scomparve e fu sostituita da altri cervi giganti. Questo ci permette di fissare, almeno entro certi limiti, la data del collegamento del Massiccio Sardo-Corso con la Toscana: anche se i cervi nani appartengono al Pleistocene superiore, è evidente che un collegamento tra le isole e la terraferma ebbe luogo tra la fine del Villafranchiano e il Mindeliano, cioè nella parte piú bassa del Pleistocene medio. *Megaceros verticornis dendrocerus* non è mai stato trovato però né in Corsica né in Sardegna. I cervi di queste isole *Megaceros cazioti*, *Megaceros algarensis* e altri, sono tutti discendenti della specie continentale divenuti, chi piú chi meno spiccatamente, nani. I piú grandi dovevano superare di poco il metro alla spalla, i piú piccoli raggiungevano appena 70-75 centimetri. È interessante il fatto che grotte anche vicine tra loro contengono in genere cervi di statura diversa. Per vari motivi di carattere biologico, è inverosimile che specie strettamente imparentate e di statura poco diversa vivessero insieme in aree ristrette. È molto piú probabile che il processo di degenerazione verso il nanismo sia stato molto rapido: in tal caso una differenza di età tra i riempimenti di due grotte, anche piccola e non risolvibile con i metodi tradizionali della geologia stratigrafica può avere avuto il risultato di fossilizzare due popolazioni di statura diversa.

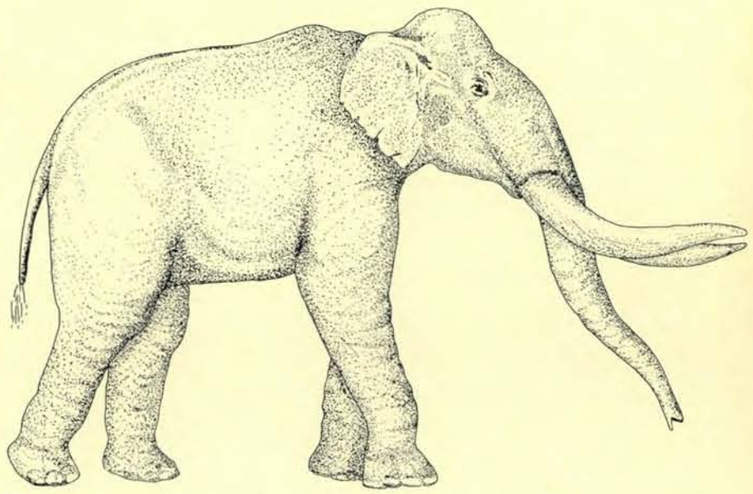
Passiamo agli altri componenti della fauna. In Sardegna sono stati trovati i resti di un piccolissimo cinghiale, ma troppo frammentari perché se ne possa stabilire con sicurezza la parentela. Vi sono anche resti di un piccolo canide che sono stati riferiti al genere *Cuon*, un'attribuzione che ci lascia perplessi; neppure questi comunque ci illuminano sui rapporti tra faune insulari e faune continentali. Ma gli altri elementi faunistici hanno indubbiamente un'aria molto « antica ». Vi è in Sardegna una bertuccia nana, *Macaca majori*: una specie di bertuccia, *Macaca florentina*, viveva in Toscana nel Villafranchiano superiore, ma non si ha notizia di altre bertucce nel continente dopo la fine del Villafranchiano. In Sardegna è stato trovato inoltre qualche resto di un'antilope che sembra strettamente imparentata con il goral (*Nemorhoedus goral*) dell'Asia centro-orientale, e uno stretto parente del goral, *Gallogoal meneghinii*, era abbastanza diffuso nel Villafranchiano superiore della Francia meridionale e della Toscana: ma neppure questo sopravvisse al Villanfranchiano. Vi è poi un piccolo elefante, *Elephas lamarmorai*, stranamente scarso in confronto agli elefanti nani della Sicilia. Ne sono state trovate alcune ossa degli arti, oggi in parte perdute, e piú recentemente due molari isolati. Già nel 1883 il paleontologo inglese C.J. Forsyth Major rilevò nelle ossa del carpo e del tarso delle analogie tra il piccolo elefante sardo e *Elephas meridionalis*, una specie caratteristica del Villafranchiano superiore europeo. Successivamente la posizione sistematica dell'elefante sardo è stata oggetto di interpretazioni diverse e contrastanti, ma i molari non lasciano dubbio che Forsyth Major aveva visto giusto. La statura di questo animale doveva aggirarsi, a quanto pare, attorno a 1,80 m o anche un po' meno.

Vi sono poi altre due specie che non possono essere considerate nane, ma che hanno ugualmente interesse per l'origine della fauna. Una di queste è un carnivoro della famiglia dei mustelidi, *Enhydrictis galictoides*, un animale di abitudini semiacquatiche e un po' piú piccolo di una lontra. Questo mustelide non ha parenti nelle faune europee del Pleistocene medio e superiore, ma il genere *Enhydrictis* era alquanto diffuso in Europa, e anche in Italia, nel Villafranchiano, anche se con specie diverse da quella della Sardegna. L'altra specie è un piccolo lagomorfo della famiglia degli ochotonidi, *Prolagus sardus*, che sembra essere sopravvissuto in Sardegna e in Corsica fino ai tempi storici; e anche il genere *Prolagus* visse nell'Europa continentale, compresa l'Italia, nel Villafranchiano, ma si estinse dopo questo periodo.

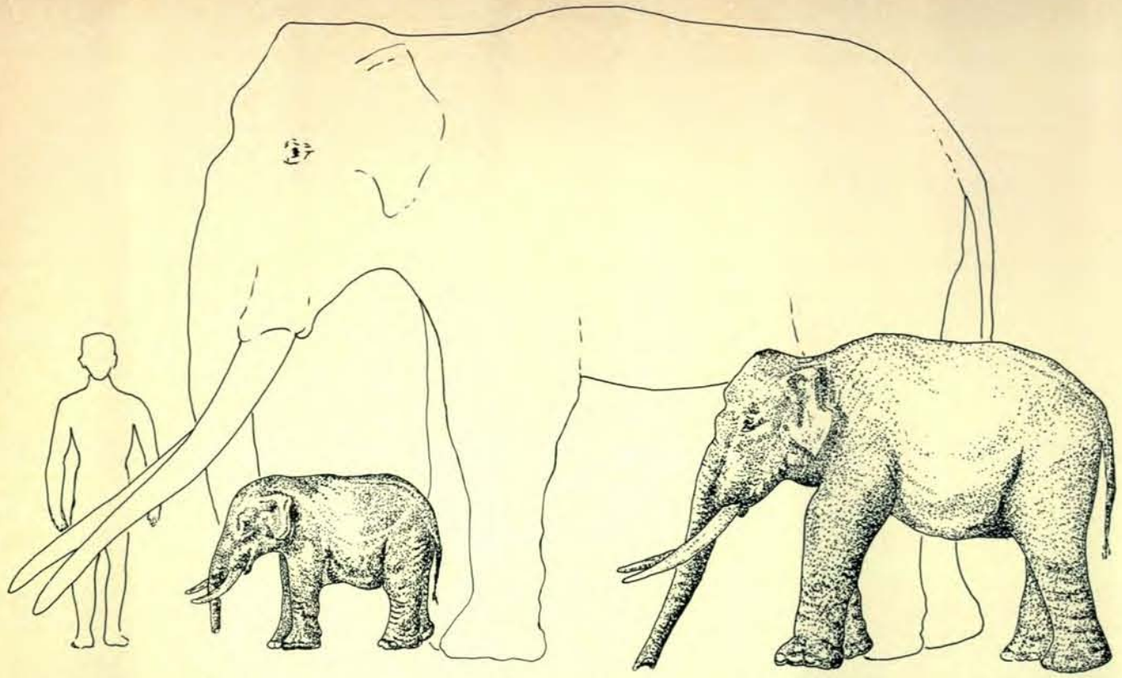
Nella fauna quaternaria sardo-corsa troviamo quindi elementi imparentati con le faune continentali villafranchiane – l'antilope, l'elefante, la bertuccia, il mustelide e il prolago – insieme a elementi – i cervi – imparentati con le faune immigrate subito dopo la fine del Villafranchiano. Si tratta di due ondate migratorie successive, o di migrazioni avvenute durante un unico periodo di



Ricostruzione di *Megaceros* (*Megaceroides*) *algarensis*, basata su un esemplare dei dintorni di Alghero. L'animale è un discendente di *M. verticornis* e raggiungeva la statura di circa un metro al garrese. Si osservi che per quanto la statura equivalga a circa i 2/3 di quella della specie progenitrice, lo sviluppo dei palchi è ridotto circa a metà. In Corsica e in Sardegna sono vissuti altri cervi simili a questo, quasi tutti di statura un poco inferiore. A fianco, per confronto, il piccolo cervo di Creta, *M. cretensis*. In alto, la testa di *Megaceros* (*Megaceroides*) *cretensis*, il piú piccolo dei Magaceridi insulari (statura circa 60 cm al garrese). Si noti l'estrema riduzione e semplificazione dei palchi alla cui base i cercini rimangono stranamente larghi rispetto all'esile asta.



Maschio adulto di *Elephas meridionalis*, una specie molto diffusa nel Villafranchiano superiore europeo; la ricostruzione è basata sugli esemplari del Valdarno superiore. La statura era di circa 3,55 m al garrese e 3,70 m alla sommità del cranio. Verso la fine del Villafranchiano *E. meridionalis* ha dato origine nell'Europa occidentale a una sottospecie piú evoluta, *E. meridionalis cromerensis*, che aveva statura maggiore (3,80 m al garrese e circa 4,30 m alla sommità del cranio), difese piú grandi e cranio corto e alto. Da questo ceppo, estintosi alla fine del Villafranchiano, è probabilmente derivato l'elefante nano della Sardegna, *Elephas lamarmorai*, di cui si conoscono solo frammenti.



Elephas falconeri e *Elephas mnaidriensis* (*a destra*), due discendenti siciliani e maltesi di *Elephas antiquus*, messi a confronto con il loro progenitore che è immigrato in Europa occidentale all'inizio del Pleistocene medio e vi è sopravvissuto fino all'ultimo periodo interglaciale. I rappresentanti piú antichi di questa specie sono poco noti. La ricostruzione è basata su esemplari di una sottospecie progredita, *Elephas antiquus italicus*, vissuta nel Riss e nel successivo interglaciale. La statura poteva raggiungere circa 4 m al garrese. *Elephas falconeri*, alto meno di un metro, è il piú piccolo proboscidato di cui si abbia notizia.

collegamento tra le isole e il continente, avvenuto tra la fine del Villafranchiano e l'inizio del Pleistocene medio? Entrambe le alternative sono possibili e la questione appare insolubile, almeno con gli elementi che abbiamo oggi. Il collegamento col continente dovette comunque interrompersi presto, non dopo il Mindeliano, perché non troviamo nelle isole i discendenti delle faune continentali del tardo Pleistone medio. Possiamo fare anche un'altra considerazione. Tra la Corsica e l'arcipelago toscano i fondali scendono sotto i – 400 metri. Le oscillazioni marine del Pleistocene non arrivarono mai a valori cosí elevati e non sarebbero state sufficienti a stabilire un ponte tra la Toscana e la Corsica. La configurazione dei fondali era diversa nel Villafranchiano e almeno all'inizio del Pleistocene medio; forti movimenti tellurici sono sopravvenuti in seguito a modificarla.

Oltre alle specie di cui abbiamo parlato vivono in Sardegna vari altri carnivori: la volpe, il gatto selvatico, la martora, la donnola, e varie specie di roditori e insettivori, tutte rappresentate nell'isola da sottospecie endemiche. Tranne alcuni roditori, questi animali non sono rappresentati tra le faune fossili. Come e quando siano arrivati in Sardegna è poco chiaro. Vi è stato un nuovo collegamento tra le isole e il continente nel Pleistocene superiore? La cosa è improbabile, anche se non può essere esclusa; del resto, il semplice fatto che tutti i mammiferi sardi siano rappresentati da sottospecie endemiche parla in favore di una lunga segregazione della fauna insulare. Il muflone è stato certamente portato dall'uomo, forse nel Neolitico, perché nessuna pecora selvatica è mai vissuta in Europa occidentale. Sappiamo comunque che al tempo di Polibio, cioè nel secondo secolo d.C., il muflone era già diffuso nelle due isole: non vi erano invece ancora cervi né cinghiali, che sono stati portati dall'uomo piú tardi, forse ancora in epoca romana.

La situazione della Sicilia è diversa. Qui le faune cavernicole sono molto piú ricche di quelle della Corsica e della Sardegna e vi predominano gli elefanti e gli ippopotami. Abbiamo visto che gli ippopotami mancano in Corsica e in Sardegna. Gli elefanti siciliani non hanno niente a che vedere col piccolo elefante sardo né con *Elephas meridionalis*. Come riconobbe fino dal secolo scorso il paleontologo tedesco H. Pohlig, sono strettamente imparentati con una specie immigrata in Italia nel Cromeriano o nel Mindeliano e sopravvissuta fino all'inizio dell'ultimo periodo glaciale: *Elephas antiquus*, un animale di statura enorme, dalle forme pesanti, con un grosso cranio massiccio munito di due lunghe zanne divaricate e quasi dritte. I molari si distinguono facilmente da quelli di *Elephas meridionalis* e dei suoi parenti perché hanno una corona molto piú stretta e allungata. Anche in Sicilia gli elefanti sono diventati nani. Vi sono due specie di statura diversa: *Elephas mnaidriensis*, che variava tra 1,50 e 1,90 m, e *Elephas falconeri*, alto appena 80-90 cm, il caso di nanismo piú spinto che si conosca tra i proboscidati, e forse il piú strabiliante tra i grandi mammiferi. Risulta anche, dalla posizione in cui i fossili sono stati trovati, che la specie piú piccola è anche la piú recente; entrambe però sono vissute nel Pleistocene superiore, per cui la degenerazione della statura, almeno nelle fasi finali, deve essere stata rapidissima.

Agli elefanti e ippopotami seguono, per importanza numerica, i cervi nani, di cui la grande maggioranza sono imparentati con il cervo comune europeo, *Cervus elaphus*, e non hanno niente a che vedere con i cervi della Corsica e della Sardegna. Vi sono poi altri mammiferi nani, ma scarsi di numero. Sono stati segnalati un orso, una volpe e una iena; inoltre un bue selvatico e un bisonte, ma queste due specie hanno statura poco inferiore a quella dei buoi e dei bisonti del Pleistocene continentale. Vi è poi, stranamente, il ghiro gigante, *Leithia melitensis*. Vi è anche un rappresentante dei cervi giganti, *Megaceros messinae*, ma raro e rappresentato da frammenti. Sembra imparentato con *Megaceros verticornis* e con i cervi sardo-corsi: però è decisamente piú antico della fauna a elefanti e ippopotami nani.

La fauna di Malta è simile a quella della Sicilia e molte specie sono comuni alle due isole. *Elephas mnaidriensis* prende nome, in effetti, da una grotta di Malta, e *Leithia melitensis* dal nome latino dell'isola. È certo che nel Pleistocene le isole maltesi sono state collegate alla Sicilia per un periodo abbastanza lungo. Vi è anche, a Malta, una tartaruga gigante di cui finora non si è trovato traccia in Sicilia.

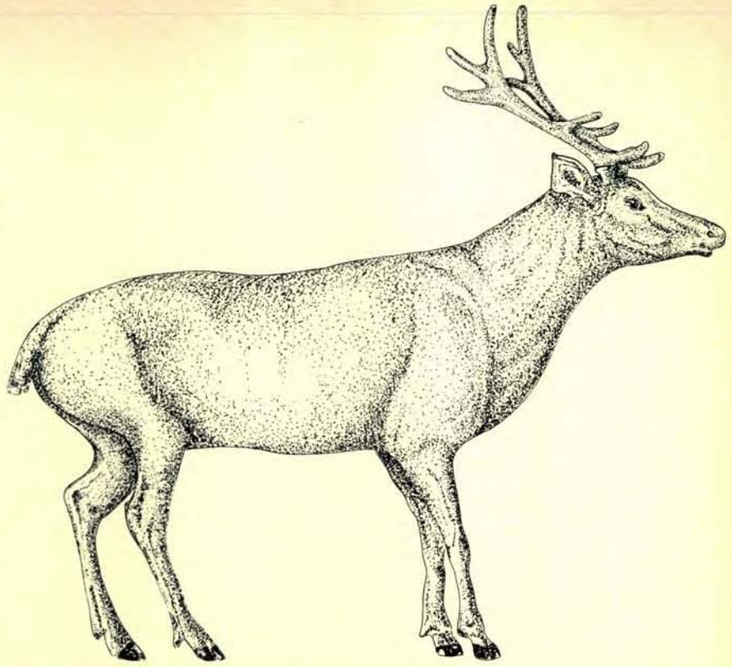
Lo stretto che separa la Sicilia dalla Calabria si è formato in corrispondenza di una grande faglia a movimento prevalentemente orizzontale, che da Messina decorre lungo la costa orientale dell'isola fino alla piana di Catania e poi si addentra, mantenendo la stessa direzione, a separare l'altipiano degli Iblei dalla regione di Gela. Come tutte le faglie di questo tipo, è stata attiva a varie riprese e per lungo tempo, e lo è tuttora; alla sua attività sono legate le manifestazioni vulcaniche terziarie degli Iblei, l'apparato molto piú recente dell'Etna, e la nota attività sismica dello stretto. È chiaro che nei collegamenti tra Sicilia e continente hanno influito, oltre alle fluttuazioni del livello del mare, vari movimenti tellurici.

La spiccata differenza tra le faune della Sicilia e Malta da un lato, e quelle della Corsica e Sardegna dall'altro, dimostra al di là di ogni dubbio che i popolamenti delle isole sono avvenuti in tempi diversi. In Sicilia non vi è finora traccia della fauna villafranchiana. *Megaceros messinae*, insieme ad alcuni molari di *Elephas antiquus* trovati vicino a Palermo, sembrano essere gli unici testimoni di un primo collegamento tra Sicilia e continente avvenuto nel Pleistocene medio, probabilmente durante la glaciazione mindeliana. Il resto della fauna è piú recente ma discende da specie che popolarono la penisola piuttosto a lungo. Confrontando faune continentali e insulari si può concludere che un secondo collegamento, quello durante il quale immigrò la maggior parte della fauna endemica siciliana, risale alla glaciazione rissiana, cioè a un periodo compreso tra 350 mila e 230 mila anni fa. La maggior parte delle specie nane sembra essersi estinta durante la glaciazione würmiana o poco dopo. Partendo ovviamente da specie di statura normale, la degenerazione verso il nanismo dovette avvenire nel volgere di 100 000-200 000 anni circa.

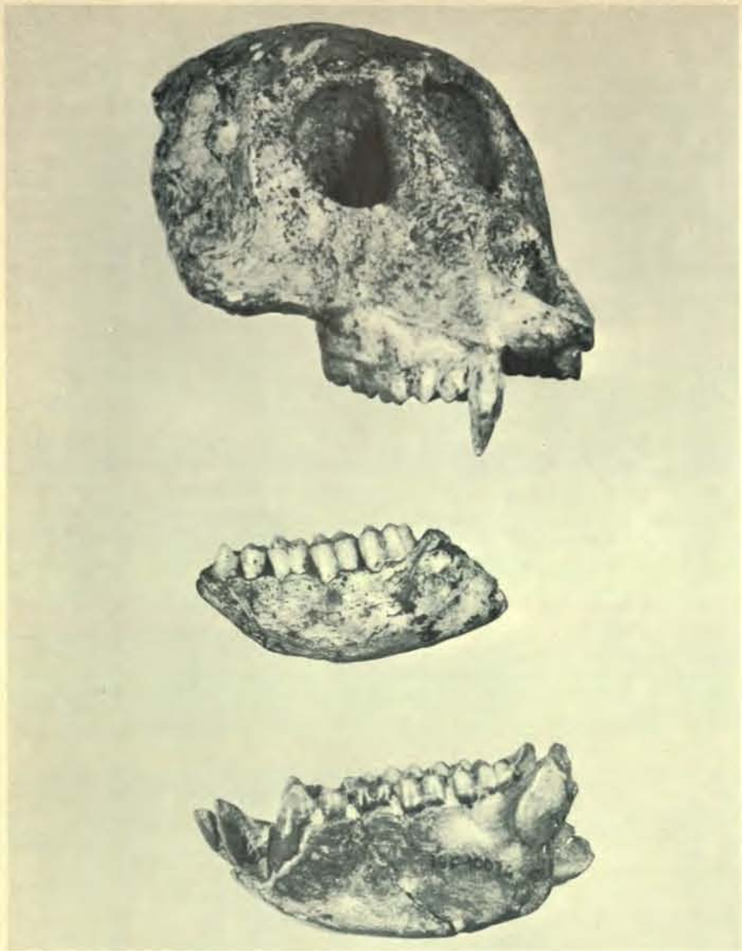
Vari indizi faunistici fanno ritenere che vi sia stato anche un terzo collegamento tra Sicilia e continente nel Würmiano: ma a questo punto l'influenza dell'uomo sulle faune comincia a pesare in maniera sensibile, al punto di sviare le indagini.

Altre isole del Tirreno che hanno dato resti di mammiferi nani sono Pianosa e Capri. La fauna di Pianosa è nota da oltre un secolo ma è rappresentata da resti piuttosto frammentari. L'elemento piú interessante è un piccolo cervo dalle gambe singolarmente corte e gracili, imparentato col cervo comune europeo. L'età del popolamento di questa isola rimane un po' incerta. Poiché i fondali nell'Arcipelago Toscano non scendono sotto i – 130 m, è molto probabile che l'isola sia stata popolata durante la glaciazione würmiana e che i mammiferi siano divenuti nani quando l'isola è rimasta staccata dal continente in seguito all'ultima risalita del livello marino; il che potrebbe essere avvenuto non piú di 20 000 anni fa.

A Capri resti fossili sono stati trovati solo nella Grotta delle Felci, sulla costa meridionale dell'isola. La maggior parte della fauna è costituita da cervi che appartengono a un'unica specie, *Cervus tyrrhenicus*; vi sono inoltre roditori e uccelli. I depositi fossiliferi sono stati trovati sotto uno strato a industria neolitica, ma sulla loro età non abbiamo altri particolari. Il cervo è rappresentato da oltre venti esemplari dei due sessi ed è un animale di statura piuttosto piccola ma non piccolissima. La femmina raggiungeva circa 90 cm al garrese, il maschio qualche centimetro in piú; le zampe sono corte e esili in proporzione al tronco. I palchi sono estremamente variabili di forma e alcuni presentano un aspetto decisamente anormale. È chiaro però che il cervo della Grotta delle Felci è uno stretto parente del cervo comune europeo, anzi a quanto pare di una sottospecie a palchi grandi e poco ramificati, diffusa nel Pleistocene superiore italiano, *Cervus elaphus aretinus*. Il collegamento di Capri alla Penisola Sorrentina e il successivo distacco sono



Cervus tyrrhenicus, del Pleistocene superiore dell'isola di Capri. La statura è all'incirca quella di un daino, ma il corpo è un po' tozzo, la testa grossa e le zampe gracili. I palchi erano estremamente variabili per forma e per numero di punte; i palchi caratteristici di questo esemplare somigliano superficialmente a quelli tipici del daino, ma la specie è imparentata col cervo comune europeo, *Cervus elaphus*.



Cranio e mandibola di *Macaca majori*, una bertuccia nana i cui resti fossili sono stati trovati in una breccia ossifera presso Olbia, in Sardegna. Per confronto (*sotto*) è figurata una mandibola di *Macaca florentina*, una bertuccia presente nel Villafranchiano superiore del Valdarno. Tutti i pezzi appartengono a individui di sesso maschile.

quindi molto recenti, e probabilmente risalgono al periodo glaciale würmiano.

Sulle isole mediterranee fuori dell'area italiana abbiamo dati piú scarsi. A Creta sono stati trovati resti piuttosto frammentari di elefanti nani imparentati con *Elephas antiquus*, di ippopotamo e di un piccolo cervo, *Megaceros cretensis*, che al pari dei cervi della Corsica e della Sardegna è uno stretto parente di *Megaceros verticornis*. Il cervo di Creta ha però portato all'estremo la degenerazione del nanismo: la sua statura era di soli 60-65 cm e i palchi, non piú lunghi di una spanna, avevano due sole punte. Le caviglie ossee di sostegno dei palchi sono grosse, in singolare contrasto con l'asta sottilissima. Spesso i palchi presentano la parte superiore consumata, come per ripetuti sfregamenti contro le pareti delle grotte, nelle quali questi piccoli cervi dovevano trascorrere periodi piuttosto lunghi. Non vi è traccia della fauna villafranchiana: il collegamento dell'isola al continente non è quindi piú antico del Pleistocene medio, e il distacco definitivo dell'isola non dovrebbe essere piú tardo della glaciazione mindeliana. L'immigrazione delle faune a Creta è poco piú tarda dell'immigrazione in Sardegna e in Corsica. A Cipro sono stati trovati solo resti scarsi di ippopotami e di elefanti; sembra che la sua storia non sia dissimile da quella di Creta.

Il caso delle Baleari è diverso. L'unico grande mammifero è *Myotragus balearicus*, un'antilope di piccola statura, con zampe corte, adattate ai terreni accidentati. Questo animale presenta la strana caratteristica di avere gli incisivi inferiori prismatici, ad accrescimento continuo, come quelli dei roditori (gli incisivi superiori mancano come in tutti i ruminanti). *Myotragus balearicus* non ha nessuna parentela con le antilopi del Quaternario del continente e neppure, per quanto ne sappiamo, con le antilopi del Pliocene. È probabile che il distacco delle Baleari dall'Europa continentale risalga molto addietro nel tempo, forse al Miocene superiore, cioè oltre 7 milioni di anni fa.

Varie isole della Sonda, Giava, Celébes, Flores, Timor, hanno dato resti di proboscidati nani del genere *Stegodon*, strettamente imparentati con gli elefanti, dai quali differiscono piú che altro per i molari a corona piú bassa. Anche se non si è arrivati a casi estremi di nanismo come in Sicilia, sono vissuti in queste isole degli stegodonti di statura inferiore al metro e mezzo. Gli stegodonti nani sono certamente relitti di faune quaternarie, o tutt'al piú del Pliocene superiore; non siamo tuttavia in grado di ricostruire nei particolari le vicende della paleogeografia di queste isole.

Il Madagascar pone problemi diversi e meno complessi. Certamente il distacco di quest'isola dal continente è molto antico e vi troviamo una fauna fortemente specializzata: lemuridi, viverridi e particolari famiglie di insettivori e di roditori, tutti discendenti di mammiferi che dovevano essersi insediati in Africa dal Terziario inferiore. Vi troviamo però anche il cinghiale di fiume (*Potamochoerus*) e una specie decisamente nana di ippopotamo, *Hippopotamus lemerlei*, estintasi in epoca preistorica ma recentissima. Era un animale di circa un metro di statura, alquanto piú piccolo quindi dell'ippopotamo nano della Sicilia. Ora, sappiamo che cinghiali e ippopotami sono di origine asiatica e sono immigrati in Africa nel Pliocene. Se il cinghiale di fiume vi sia arrivato da sé o sia stato importato dall'uomo non è chiaro, ma l'ippopotamo vi è certamente arrivato per conto suo, e molto prima che l'uomo mettesse piede sull'isola. *Hippopotamus lemerlei* è abbastanza strettamente imparentato con *Hippopotamus amphibius* ma non ne è certo un discendente diretto: presenta anzi alcuni caratteri primitivi che dimostrano che è derivato da una specie meno evoluta di quella che vive oggi, e che probabilmente visse nell'Africa continentale nel Pliocene; ed è facile concludere da questo che i primi ippopotami sono arrivati nel Madagascar nel Pliocene, o tutt'al piú nel Pleistocene antico. Probabilmente la via di comunicazione era costituita da una serie di isole separate da acque basse, perché all'infuori dell'ippopotamo e forse del cinghiale di fiume nessun mammifero di abitudini compiutamente terrestri è migrato dal continente all'isola o viceversa nel Terziario superiore. La fauna del Madagascar presenta anche altri caratteri propri delle faune insulari. L'ippopotamo, come abbiamo visto, è nano; per contro, fino a epoca recentissima vi sono vissute varie specie di lemuri di grande statura e che avevano abbandonato la vita arboricola per assumere abitudini terrestri, e vari uccelli corridori giganteschi, tra cui i piú noti sono gli *Aepyornis* o « uccelli elefanti ». Tutto questo è dovuto al lungo periodo di isolamento della fauna malgascia, interrotto solo, verso la fine del Terziario, dall'immigrazione degli ippopotami e forse dei cinghiali, che non devono aver turbato gran che l'equilibrio biologico dell'isola.

Possiamo tornare adesso ai quesiti posti all'inizio di questo scritto: quali possono essere state le cause del nanismo dei grandi mammiferi, come del gigantismo di alcuni piccoli mammiferi, uccelli e rettili? Quali le cause della rapida scomparsa di tante specie insulari?

Ritengo che la causa principale delle modificazioni subite dalle specie insulari sia stata la mancanza di pressione selettiva. In altre parole, ogni specie vivente è soggetta in natura a competere con altre specie: animali predatori, animali o piante che contendono lo spazio vitale o il cibo. Nei grandi mammiferi la statura elevata rappresenta un mezzo di difesa e quindi un carattere vantaggioso. La competizione esercitata piú che altro dagli animali predatori fornisce la « pressione selettiva » necessaria a mantenere questa statura, eliminando gli individui piú gracili. Nelle isole, dove i grandi carnivori sono scarsi o assenti, questa pressione è venuta a mancare: individui portatori di mutazioni che provocano una riduzione di statura hanno potuto cosí sopravvivere e hanno avuto modo di diffondere nella popolazione i geni mutanti. Analogamente, per mancanza di pressione selettiva il ghiro della Sicilia e di Malta è diventato gigante, i lemuri malgasci hanno abbandonato gli alberi e sono diventati grossi e pesanti, molti uccelli insulari hanno perduto l'attitudine al volo.

Alla mancanza di pressione selettiva si sono sovrapposti altri fattori. L'endogamia, cioè il frequente reincrocio entro popolazioni ristrette, può avere favorito l'affermarsi di mutazioni di tipo piú o meno patologico. D'altra parte in alcuni casi particolari, come in isole piccole o povere di vegetazione, la riduzione di statura può avere costituito un vero vantaggio, diventando cosí un carattere adattativo.

È stato supposto talvolta che la degenerazione dei grandi mammiferi delle isole mediterranee sia dovuta al clima troppo rigido delle fasi glaciali quaternarie, o troppo arido delle fasi interglaciali. È un'ipotesi che può essere valida in qualche caso, in particolare per gli elefanti e gli ippopotami, ma certamente non è adeguata a spiegare il fenomeno nella sua interezza perché cervi, elefanti e ippopotami vivevano nello stesso tempo nel continente, in condizioni di clima non diverse da quelle delle isole. D'altra parte, se elefanti e ippopotami soffrono di un clima relativamente rigido, lo stesso non può dirsi dei cervi, che trovano il loro ambiente migliore nelle regioni temperato-fredde. Per di piú un'ipotesi del genere cade completamente in difetto per le isole della Sonda e il Madagascar, dove anche durante il Quaternario il clima non può mai essere stato troppo freddo né troppo arido. Con ciò non si può escludere del tutto che qualche specie insulare possa essere degenerata e finalmente essersi estinta per le condizioni ambientali divenute avverse: si può dire solo che una tale ipotesi non fornisce una spiegazione valida per tutte le specie insulari, ma tutt'al piú per un ristretto numero di esse. È comunque significativo il fatto che nelle isole mediterranee, dove gli inverni dovettero essere rigidi durante i periodi glaciali, le faune si trovano spesso accantonate nelle grotte, mentre nelle isole tropicali si trovano in depositi all'aria aperta: almeno alle medie latitudini il clima può avere esercitato un'influenza negativa sui grandi mammiferi.

Ma oltre a questi fattori vi è stata una causa piú generale che ha provocato una vera decimazione nella grossa selvaggina del tardo Pleistocene, e che sembra essere stata ancora piú attiva nelle isole che sui continenti, appunto perché nelle isole si erano sviluppate specie relativamente indifese. Questa causa è l'uomo, e precisamente l'uomo del tardo Paleolitico. Fu in questo periodo che la specie umana si accrebbe notevolmente e apprese a fabbricarsi frecce e altre armi, vivendo in prevalenza dei proventi della caccia. L'influenza dell'uomo del tardo Paleolitico sulla grossa selvaggina è impressionante. Per restare all'Europa, furono sterminati in questo periodo l'orso delle caverne (*Ursus spelaeus*), il mammut (*Elphas primigenius*), il rinoceronte lanoso (*Coelodonta antiquitatis*), il cervo gigante del tardo Pleistocene (*Megaceros giganteus*), il bisonte (*Bison priscus*) e il piccolo equide *Equus hydruntinus*, mentre il cavallo (*Equus caballus*) fu ridotto all'orlo dell'estinzione; il bue selvatico (*Bos primigenius*) diminuí fortemente di numero, e in conseguenza di tutto questo declinarono fortemente anche i grandi carnivori. Nell'Europa continentale il declino della grande selvaggina avvenne nel volgere di tempo tra circa 20 000 e 10 000 anni fa, cioè decisamente dopo l'ultima punta di freddo, che si colloca circa 18 000 anni fa. Negli altri continenti si verificarono estinzioni altrettanto subitanee e massicce, particolarmente nelle due Americhe, ma neppure l'Australia, dalla popolazione umana cosí rada, sfuggí al fenomeno. Le tecniche di datazione col carbonio radioattivo hanno mostrato che le estinzioni non furono contemporanee nei vari continenti e non coincisero neppure con i periodi di clima piú freddo, mentre avvennero in concomitanza con l'arrivo dei popoli cacciatori, portatori di civiltà simili a quelle del nostro Paleolitico superiore. Nel Madagascar la scomparsa degli ippopotami nani, dei grandi lemuri terrestri e dei giganteschi uccelli inetti al volo coincise ugualmente con l'arrivo dell'uomo, che qui avvenne singolarmente tardi, nel 1100 d.C.

In Sicilia e a Malta l'uomo arrivò nel Paleolitico, e fu presumibilmente lo sterminatore delle faune insulari. In Sardegna, malgrado qualche incerta indicazione in contrario, sembra che l'uomo sia arrivato solo nel Neolitico. Sarebbe interessante verificare la data dell'estinzione delle faune insulari in rapporto con la comparsa dell'uomo, ma per le isole mediterranee questo studio non è ancora stato fatto.

C'è anche da chiedersi se l'eccezionale ricchezza di fauna di alcune grotte non sia in qualche modo in rapporto con l'attività dell'uomo: se cioè le popolazioni paleolitiche non avessero appreso a tenere prigionieri gli animali nelle grotte, sbarrando in qualche modo gli accessi, per poterli cacciare piú facilmente. Certo è che le tecniche di caccia erano primitive: frecce e lance di pietra, trabocchetti; nel caso di grossi animali, dovevano venire attaccati di preferenza i giovani. Talvolta la caccia si faceva spaventando i branchi e spingendoli verso dirupi per farli precipitare. Il tutto era fatto senza alcuna considerazione del rischio di sterminare la selvaggina e inaridire cosí le fonti stesse del proprio sostentamento. La povertà delle civiltà mesolitiche in confronto a quelle del tardo Paleolitico potrebbe derivare proprio all'esaurirsi delle risorse della caccia.

GIOCHI MATEMATICI

di Martin Gardner

Curve cicliche generate da ruote che rotolano su altre ruote

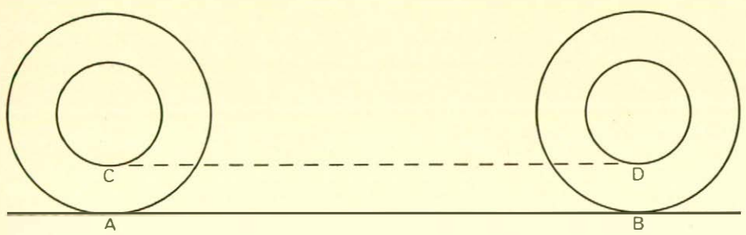
Lo straordinario paradosso di rotondi oggetti lisci che conquistano spazio col semplice rotolare piú e piú volte, invece di sollevare faticosamente membra pesanti per avanzare, deve aver provocato nell'ancor giovane genere umano uno shock molto salutare.

VLADIMIR NABOKOV, *Parla, o memoria.*

Il mondo sarebbe molto diverso senza la ruota. A parte il problema dei trasporti, se consideriamo l'uso della ruota come macchina semplice – carrucole, ingranaggi, giroscopi e cosí via – è molto difficile immaginare una civiltà progredita che ne sia priva. H.G. Wells, nel suo libro *La guerra dei mondi* descrive una civiltà marziana molto piú sviluppata della nostra, ma che non usava ruote nei suoi complicati macchinari; Wells probabilmente ha voluto dire qualcosa di originale. Si può facilmente capire come gli indiani d'America non siano arrivati a scoprire la ruota ma la stessa cosa non è pensabile in una società in grado di mandare astronavi da Marte alla Terra.

Fino a poco tempo fa si pensava che l'uso della ruota avesse avuto origine in Mesopotamia. Infatti si sono trovati in quella regione dei dipinti raffiguranti carri dotati di ruote che risalgono al 3000 a.C., e sono stati dissotterrati autentici resti di pesanti dischi foggiati a ruote che risalgono al 2700 a.C. Dopo la seconda guerra mondiale tuttavia degli archeologi russi hanno trovato nel Caucaso modelli in ceramica di carri ruotati il che fa pensare che la ruota potrebbe essere stata scoperta nella Russia meridionale molto prima che in Mesopotamia. Può anche darsi che la ruota sia stata scoperta in due o tre posti diversi, o che la nuova invenzione si sia diffusa nel mondo passando di bocca in bocca.

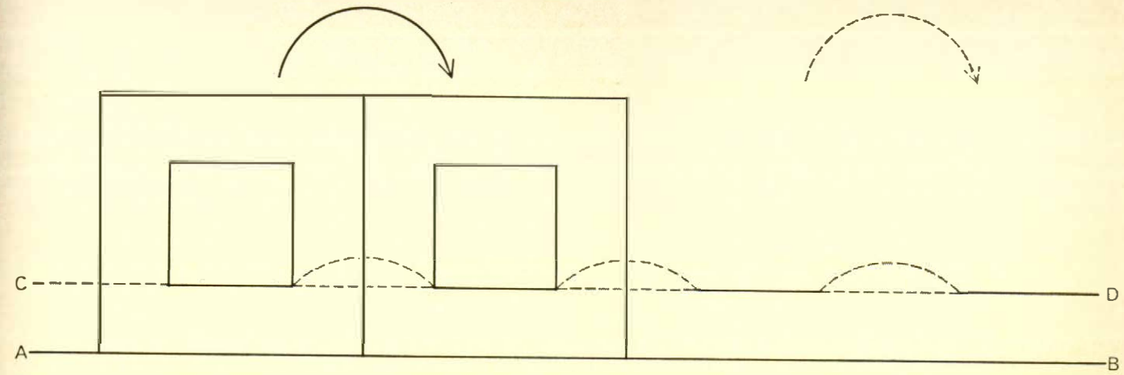
A prima vista appare molto strano che con l'evoluzione non sia mai apparsa la ruota come mezzo di locomozione animale, ma poi pensandoci bene ci si rende conto di quanto sarebbe stato difficile per la natura la formazione di meccanismi biologici che facessero ruotare estremità siffatte. (D'altra parte l'artista tedesco Maurits C. Escher ha disegnato una creatura in grado di appallottolarsi su se stessa e di rotolare molto velocemente. E chi potrebbe essere certo che tali esseri non si sono sviluppati su altri pianeti?) Può anche darsi che esista qualche meccanismo microscopico girevole dentro le cellule dei corpi viventi terrestri, che avrebbe il compito di svolgere e riavvolgere cordoni a doppia elica di DNA, ma la sua esistenza è ancora una pura supposizione.



Il paradosso della ruota di Aristotele.

Una ruota che rotola ha molte proprietà paradossali. È facile vedere che i punti che stanno vicino alla sommità della ruota hanno una velocità relativa al suolo molto piú alta dei punti che stanno in basso. La velocità massima è raggiunta dal punto, nella parte esterna della ruota, che si trova piú in alto, mentre i punti a contatto col suolo hanno velocità minima (zero). Per le ruote a flange del treno, i cui orli scendono un poco sotto la rotaia, c'è persino un breve tratto in cui un punto del bordo si muove all'indietro. G.K. Chesterton, in un saggio sulle ruote nel suo libro *Alarms and Discursion* paragona la ruota a una società sana che abbia « una parte che perpetuamente si lancia verso il cielo; e una parte che perpetuamente butta giú la testa nella polvere ». Egli ricorda ai suoi lettori, con una caratteristica osservazione alla Chesterton che « non si può avere una Rivoluzione senz

Il piú geniale tra tutti i paradossi sulla ruota è stranamente poco conosciuto, sebbene sia stato citato già nella *Meccanica*, un trattato greco attribuito ad Aristotele ma piú probabilmente scritto da un suo discepolo. La « ruota di Aristotele », come viene di solito chiamato questo paradosso, è stata oggetto di molti studi ai quali hanno portato il loro contributo matematici famosi come Galileo, Cartesio, Fermat e molti altri. Mentre la ruota grande della figura in questa pagina rotola da *A* a *B*, il bordo della ruota piccola rotola da *C* a *D* lungo la parallela ad *AB*. (Se le due linee sono percorsi effettivi, è ovvio che la doppia ruota non può rotolare con facilità su entrambi. Una può muoversi lungo il percorso superiore mentre l'altra scivola continuamente all'indietro nel tratto inferiore, oppure la ruota grande può rotolare sul tracciato inferiore mentre la piccola slitta in avanti lungo quello superiore. Tuttavia non è questo il momento interessante del paradosso). Si supponga che la ruota piú grossa percorra senza attrito il tratto da *A* a *B*. A ogni istante ci sarà un solo punto della ruota grande a contatto con il segmento *AB*, e un solo punto della ruota piccola a contatto col segmento *CD*. In altre parole i punti della circonferenza minore possono essere messi in corrispondenza biunivoca con i punti di quella maggiore. Nessun punto delle due circonferenze resta escluso. Questo parrebbe dimostrare che le due circonferenze hanno uguale lunghezza.



Il metodo con cui Galileo affrontò il paradosso della ruota.

Il paradosso della ruota di Aristotele è strettamente collegato con quello piú noto di Zenone e non è meno profondo di quest'ultimo. I matematici moderni non hanno piú dubbi su di esso in quanto sanno che il numero di punti di un segmento qualunque è misurato da ciò che Georg Cantor ha chiamato aleph-uno, il secondo dei suoi numeri transfiniti. Questo numero rappresenta « la potenza del continuo ». Tutti i punti di un segmento lungo un centimetro possono essere messi in corrispondenza biunivoca con i punti di una linea lunga milioni di chilometri, cosí come con quelli di una linea di lunghezza infinita. Anzi non è difficile dimostrare che ci sono aleph-uno punti in un quadrato o in un cubo di qualunque dimensione, o in uno spazio euclideo infinito con un numero finito di dimensioni. Naturalmente i matematici vissuti prima di Cantor non avevano familiarità con le proprietà tipiche dei numeri transfiniti, ed è divertente leggere i loro affannosi tentativi di risolvere il paradosso della ruota.

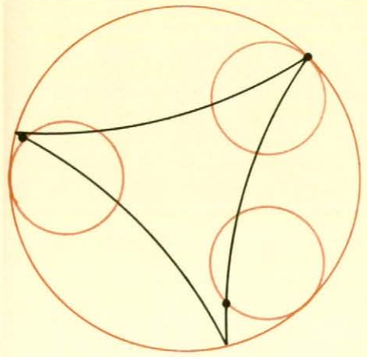
Galileo affrontò il problema considerando ciò che accade quando al posto delle due ruote si pongano due poligoni regolari, per esempio due quadrati

a rivoltarsi »

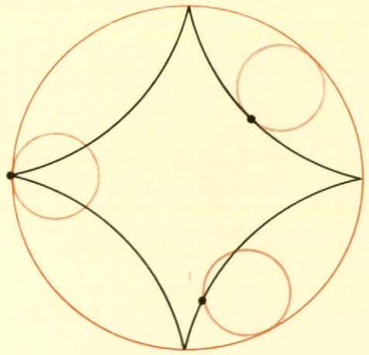
po che il quadrato maggiore ha compiuto una rotazione completa lungo la retta *AB*, i lati del quadrato piccolo hanno toccato la retta *CD* in quattro punti, saltando tre spazi. Se le ruote fossero pentagonali, il pentagono minore salterebbe quattro spazi per ogni giro completo, e cosí via per poligoni con numero di lati sempre piú grande. Al crescere del numero dei lati, cresce anche il numero degli spazi saltati, ma ognuno di questi spazi ha lunghezza sempre minore. Al limite, se il poligono ha un numero infinito di lati, gli spazi vuoti saranno infiniti, ma di lunghezza infinitamente piccola. Questi « vuoti » di Galileo non sono altro che i mistificanti « infinitesimi » che piú tardi resero cosí difficili i primi sviluppi del calcolo.

E ora siamo in un bel pasticcio. Se gli spazi vuoti lasciati dalla ruota piccola sono infinitamente brevi, perché la loro somma dovrebbe permettere che la ruota piccola percorra una distanza finita mentre la grande si muove lungo il suo percorso? I lettori a cui interessi sapere come i matematici piú moderni risposero a Galileo, e disputarono tra loro, troveranno i particolari negli articoli *Aristotle's Wheel: Notes on the History of the Paradox* di Israel E. Drabkin (« Osiris », vol. 9, pag. 162-168, 1950) e *The Wheel of Aristotle and French; Consideration of Galileo's Arguments* di Pierre Costabel («
61, pag. 527-534, 1968).

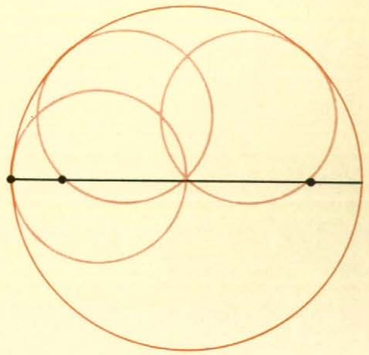
Quando una ruota si muove lungo una linea retta ogni punto della sua circonferenza genera la curva nota come cicloide. (Non tratteremo qui la cicloide, ne parleremo un'altra volta). Quando una ruota rotola in modo da essere sempre tangente internamente a un cerchio, i punti della sua circonferenza generano curve che vengono chiamate ipocicloidi. Quando essa rotola ester-



La deltoide.



L'asteroide.

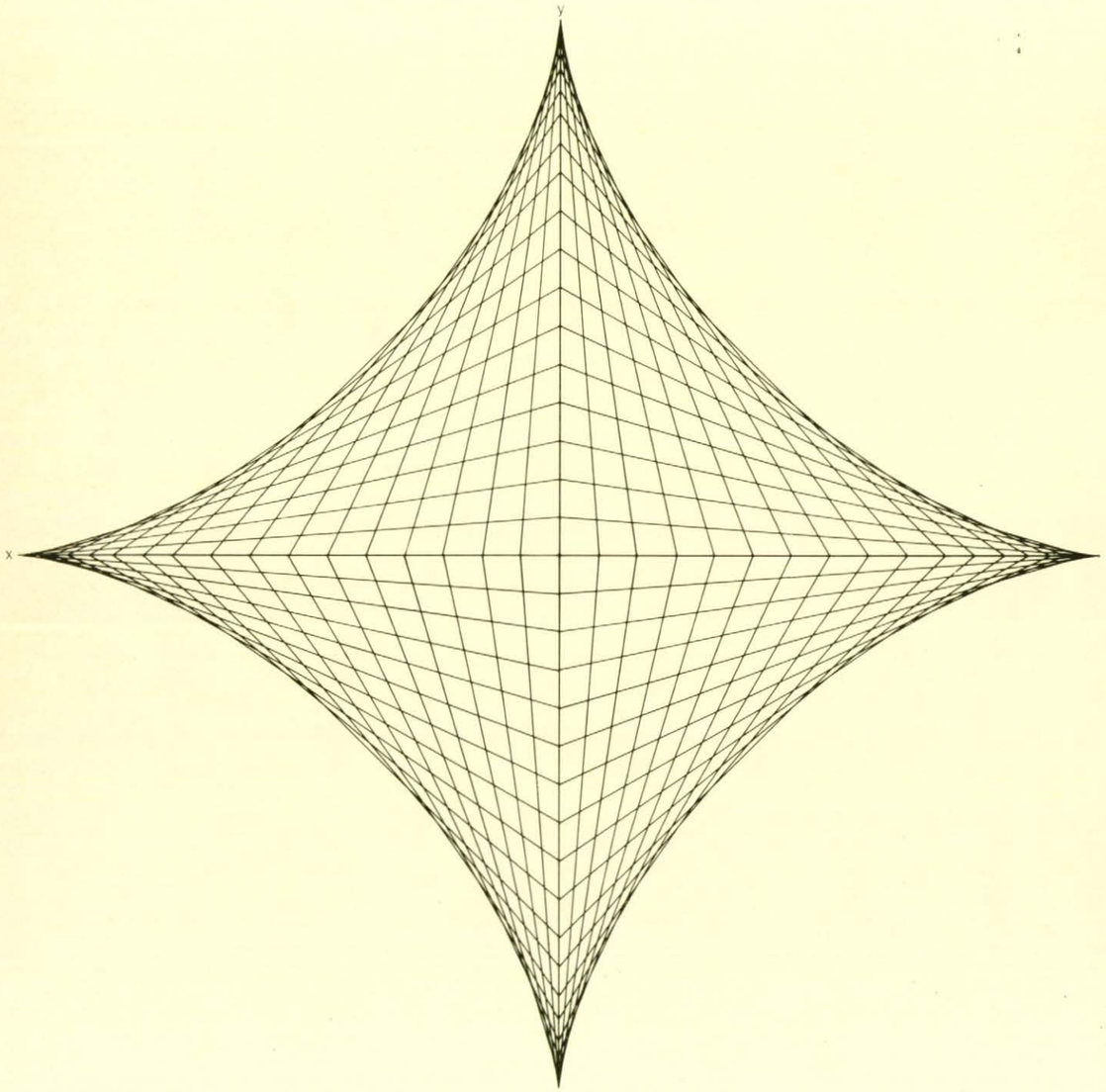


L'ipocicloide a « due » cuspidi.

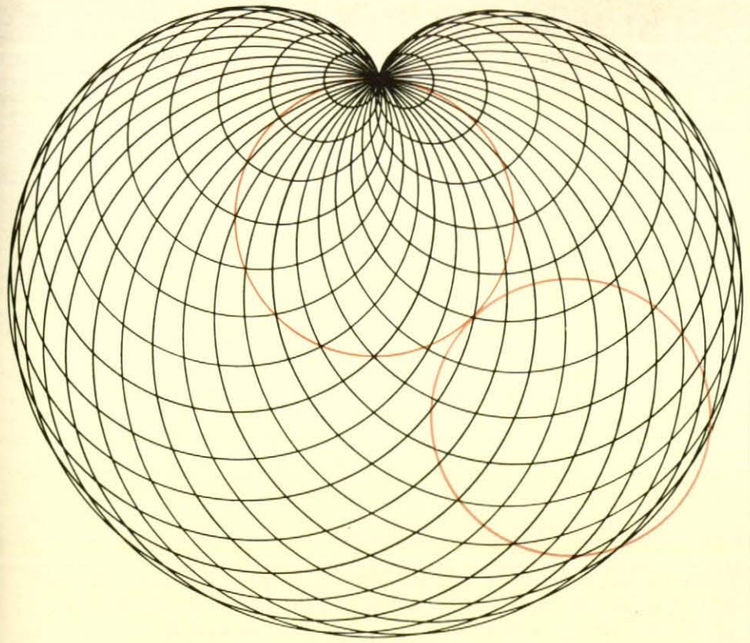
namente al cerchio, i punti della sua circonferenza generano delle epicicloidi. Sia R/r il rapporto tra il raggio R della circonferenza maggiore e il raggio r della minore. Se il rapporto R/r è un numero irrazionale, un punto a della circonferenza mobile che sia stato a contatto una volta con un punto b del cerchio fisso, non potrà toccare piú il punto b, anche se la ruota piccola continuasse a girare indefinitamente. La curva generata da a avrà un numero di cuspidi pari a aleph-zero. Se R/r è razionale, i punti a e b coincideranno dopo un numero finito di giri. Se R/r è intero, a e b si toccheranno dopo un giro completo.

Si considerino le ipocicloidi tracciate da un cerchio di raggio r che rotola internamente a un cerchio maggiore di raggio R. Quando R/r è 2, 3, 4,... i punti a e b si toccheranno di nuovo dopo un giro completo e la curva avrà R/r cuspidi. Per esempio la curva deltoide (o ipocicloide a tre cuspidi) si ottiene quando $R/r = 3$ (*si veda la figura in basso a sinistra a pag. 95*). La stessa curva deltoide si ottiene quando R/r è 3/2, quando cioè il raggio del cerchio mobile è i due terzi di quello del cerchio fisso. Tutti i segmenti tangenti alla deltoide con gli estremi sulla curva, hanno la stessa lunghezza. Quando R/r è 4 o 4/3 si ottiene l'ipocicloide a quattro cuspidi o asteroide (*si veda la figura in basso al centro a pag. 95*). I due rapporti si possono applicare a curve ipocicloidi di qualunque ordine: quando R/r è uguale a n o a n/n-1 il cerchio mobile genera una curva con n cuspidi.

Si giunge a un risultato sorprendente quando R/r è uguale a 2 (*si veda la figura in basso a destra a pag. 95*). L'ipocicloide degenera in una retta coincidente con un diametro del cerchio maggiore. Gli estremi di questo diametro possono essere considerati come due cuspidi degeneri. Sapreste descrivere la



Un'asteroide disegnata come inviluppo di un segmento di linea in movimento.



La cardioide.

Una cardioide Op-art.

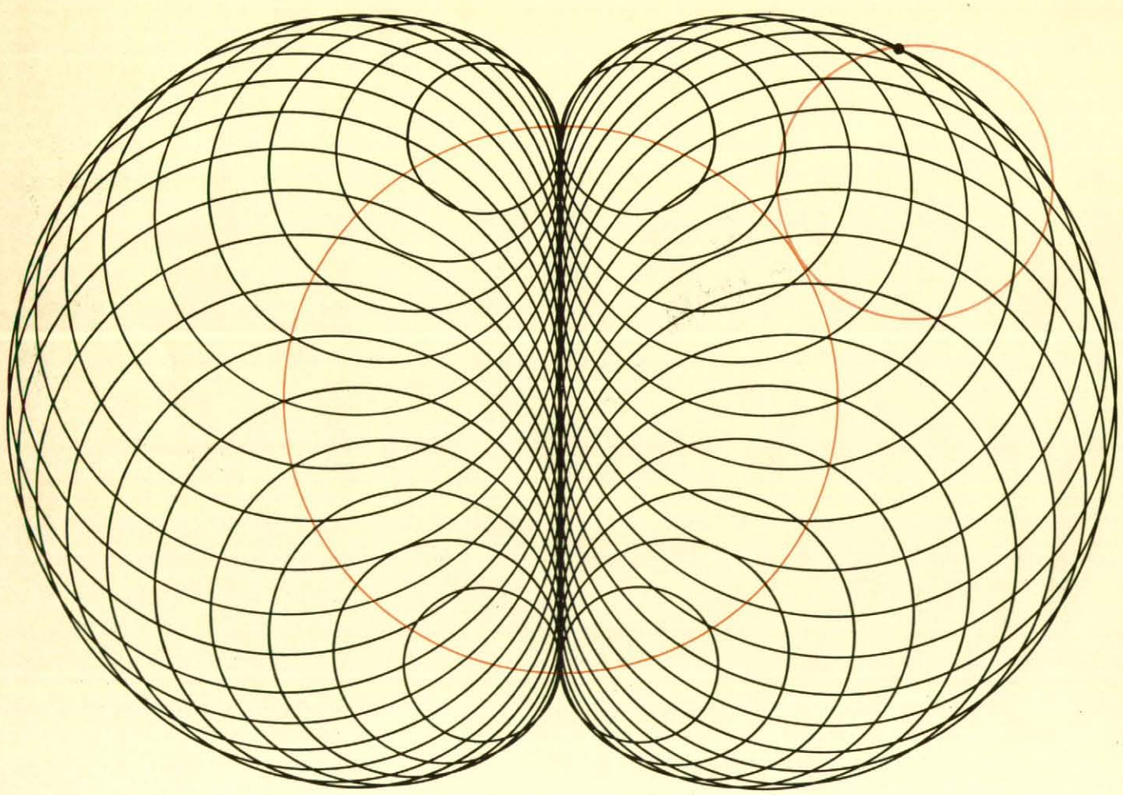
forma dell'area descritta da un dato diametro del cerchio minore? È una parte di piano limitata da un'asteroide. In altre parole si può anche dire che l'asteroide si ottiene come inviluppo di un segmento che ruota mantenendo i suoi estremi su due assi perpendicolari, come è mostrato nella figura a pagina 96.

La piú semplice epicicloide, generata da un punto di una circonferenza che ruoti toccando esternamente un'altra circonferenza, si ottiene quando le due circonferenze sono uguali. La curva risultante è a forma di cuore e si chiama cardioide (*si veda la figura in alto a pag. 97*). Tutte le corde che passano per la cuspide hanno la stessa lunghezza. La cardioide della figura è stata disegnata dividendo il cerchio fisso (*in colore piú scuro*) in 32 archi uguali e poi disegnando un insieme di cerchi i cui centri sono sul cerchio fisso e che passano per altri punti di questo cerchio. Questa figura si potrebbe colorare ottenendo uno splendido esempio di Op-art (*si veda la figura in basso a pag. 97*). (Entrambi i disegni sono di Hermann von Baravalle, *Geometrie als Sprache der Formen*, Stoccarda, 1963).

La cardioide è generata anche dal moto di un punto della circonferenza di un cerchio che rotola due volte attorno a un cerchio piú piccolo fisso e interno a essa e il cui diametro sia la metà di quello del cerchio maggiore. Questo procedimento è alla base di un interessante problema. Si immagini una ragazza che abbia un giro di vita perfettamente rotondo. Intorno alla sua vita, mentre la giovane rimane immobile, gira un hula hoop con un diametro pari a due volte il diametro della vita stessa. Quando un punto del cerchio, che ha toccato l'ombelico della ragazza, torna a toccarlo, quanto spazio ha percorso il punto? Dal momento che la curva tracciata da questo punto è una cardioide, è come se si chiedesse la lunghezza della cardioide. Non è difficile dimostrare che questa lunghezza è quattro volte il diametro del cerchio oppure otto volte quello della vita della ragazza.

Quando il diametro del cerchio mobile è la metà di quello del cerchio fisso i due cerchi sono tangenti esternamente e l'epicicloide generata è la nefroide a due cuspidi (cosí detta perché ha la forma dei reni) mostrata nella figura in questa pagina. Questo disegno mostra il cerchio che rotola e illustra anche il metodo per costruire la nefroide come inviluppo di una famiglia di cerchi tangenti all'asse centrale verticale i cui centri stanno sul cerchio fisso. Come nel caso precedente, la curva si può ottenere per mezzo di un cerchio che rotola attorno a uno piú piccolo, fisso e interno a esso; quindi, quando $R/r = 3/2$. Questo rapporto R/r è lo stesso che si ha per la deltoide, ma in questo caso è il cerchio maggiore che rotola attorno al minore.

Sia la cardioide sia la nefroide sono curve che si possono ottenere come inviluppo di raggi luminosi riflessi. La cardioide si forma quando i raggi hanno origine in un punto della circonferenza e si riflettono sulla circonferenza. La nefroide è prodotta da raggi paralleli che attraversano il cerchio, o da raggi la cui origine si trova nella cuspide della cardioide e che si riflettono sulla cardioide. Le curve dotate di cuspidi, che spesso si vedono sulla superficie del tè o del caffè in una tazza quando dei raggi luminosi provenienti da una finestra o da un'altra sorgente di luce non troppo vicina colpiscono obliquamente la superficie del liquido, forniscono una buona approssimazione di nefroide cuspidata.



La nefroide.

Ci sono svariati e imbarazzanti problemi che si occupano di « ruote » non circolari. Per esempio, si pensi a una ruota quadrata che rotoli senza scivolare su un tracciato formato da una serie di archi uguali con la parte convessa rivolta verso l'alto. A che tipo di curva dovrebbe appartenere ogni arco per fare in modo che il centro della ruota non oscilli in su o in giú? (In altre parole, si vuole che il centro della ruota proceda con moto rettilineo). Questa curva è una curva nota e, stranamente, è la stessa di cui ci si serve per costruire tracciati su cui far rotolare ruote poligonali con un numero qualunque di lati. La risposta verrà data il prossimo mese.

Il lettore provi anche a risolvere questo nuovo enigma: qual è quel mezzo di trasporto che ha otto ruote, porta solo una persona e non inquina l'atmosfera?

Il mese scorso era stato chiesto ai lettori di individuare un metodo mediante il quale fosse possibile comunicare per via radio il significato del termine « orario » agli umanoidi del Pianeta X. Si supponeva che il Pianeta X fosse in qualche punto della nostra galassia ma coperto da dense nubi che impedivano ai suoi abitanti di vedere le stelle. Si supponeva anche che gli scienziati della Terra e del Pianeta X avessero escogitato ingegnosi codici che consentivano lunghe conversazioni. Il problema consisteva nell'escogitare un modo di comunicare il significato di « sinistra » e « destra ».

Potrà sembrare strano, ma fino al dicembre 1956 *non* esisteva alcun modo di comunicare una definizione non ambigua di « destra » e « sinistra ». Secondo quella che i fisici chiamano « legge della parità », tutti i processi fisici sono reversibili; in altri termini, possono manifestarsi in entrambe le loro due immagini speculari. Certi cristalli, come il quarzo e il cinabro, hanno la proprietà di ruotare il piano di polarizzazione della luce in una certa direzione, ma questi cristalli esistono sia nella forma destra sia in quella sinistra. Lo stesso è vero per gli stereoisomeri asimmetrici che ruotano il piano di polarizzazione della luce polarizzata. I composti organici che si trovano nelle forme viventi hanno un solo tipo di orientazione, ma questo è un fatto accidentale dell'evoluzione terrestre. Non vi sono piú ragioni perché questi composti abbiano su un altro pianeta la stessa orientazione di quelli della Terra di quante non vi siano perché ci si possa aspettare che gli umanoidi del Pianeta X abbiano il cuore dalla parte sinistra.

Gli esperimenti elettrici o magnetici non ci sono di aiuto. È vero che essi mostrano asimmetrie (per esempio la « regola della mano destra » per orientare il campo magnetico che circonda una corrente elettrica), ma è solo una convenzione che decide quale polo di un magnete è il « nord ». Se potessimo comunicare al Pianeta X il significato di « polo nord », avremmo risolto il problema; sfortunatamente non si può far questo se prima non si è stabilito un accordo sul significato di destra e sinistra. Mediante codici di impulsi potremmo facilmente trasmettere fotografie al Pianeta X, ma senza accordo su destra e sinistra non potremmo essere certi che non le stampino all'incontrario.

Solo nel dicembre del 1956 fu eseguito il primo esperimento che violava la legge di parità. (Per questo esperimento i fisici americani di origine cinese T.D. Lee e C.N. Yang ebbero il premio Nobel nel 1957). Si è trovato che certe « interazioni deboli » tra particelle elementari mostrano una preferenza per un tipo di orientazione, a prescindere da ogni convenzione polo sud-polo nord. L'invio dei dettagli di un esperimento di questo tipo è il solo modo finora noto di comunicare al Pianeta X una definizione operativa non ambigua di destra e sinistra, orario e antiorario, nord e sud, o di qualsiasi altra distinzione che coinvolga l'orientazione.

Va aggiunto che se il Pianeta X fosse in un'altra galassia il problema rimarrebbe insoluto. Un'altra galassia potrebbe per esempio essere fatta di antimateria (materia fatta di particelle con carica elettrica opposta a quelle che costituiscono la normale materia). In una galassia di questo tipo l'orientazione delle interazioni deboli sarebbe probabilmente invertita e, non potendo sapere di che tipo di materia è fatta una galassia (la luce non ci può fornire questa informazione), gli esperimenti sulla violazione della parità sarebbero senza valore e non servirebbero per comunicare il significato di sinistra e destra.